

Bewertung der Dauerstandfestigkeit von dampfgehärtetem Porenbeton auf der Grundlage von Kurzzeitversuchen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der

Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Enrico Tartsch

geboren am 28. Juli 1973

in Erfurt

Mentor: Prof. Dr.-Ing. habil. Erich Raue

Koreferenten: Prof. Dr.-Ing. Karl Rautenstrauch

Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach

Tag der Disputation: 21. Januar 2008

Kurzreferat

Im Rahmen der Arbeit wird das Tragverhalten von dampfgehärtetem Porenbeton unter einachsiger Druckbeanspruchung untersucht. Ziel ist es, einen Zusammenhang zwischen makroskopischen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen, beanspruchungsbedingten Strukturänderungen und der Dauerstandfestigkeit herzustellen. Die Dauerstandfestigkeit stellt im Sinne der Arbeit eine elementare Gefügeschwelle dar, durch sie wird das stabile vom instabilen Tragverhalten abgegrenzt.

Der Zusammenhang zwischen Strukturänderungen und Spannungs-Dehnungs-Verhalten wird anhand mechanischer Modelle analysiert. Diese Untersuchungen liefern die konzeptionelle Orientierung für die durchzuführenden Laborversuche. Die experimentelle Basis der Arbeit bilden Kurzzeit- und Langzeitversuche an Porenbetonzylindern unter einachsiger Druckbeanspruchung. Es werden Probekörper von drei Porenbetonwerken untersucht. Um den Einfluss der Lastgeschichte aufzuzeigen, wird die Versuchsdauer zwischen einer Sekunde und mehreren Wochen variiert. Die Versuche werden mit unterschiedlichen Lastregimen durchgeführt: sowohl mit monoton gesteigerter Beanspruchung bis zum Versagen bzw. bis zum vorgesehenen Beanspruchungsniveau als auch mit niederzyklischer Beanspruchung.

Die Messdaten werden unter Einbeziehung der dreidimensionalen Ansätze der Spannungs- und Deformationstheorie hinsichtlich des sphärischen und des deviatorischen Anteils des Spannungs- und Verformungszustandes ausgewertet. Diese auf die separate Betrachtung der Volumen- und Gestaltänderung gestützte Auswertung liefert zusätzliche Erkenntnisse hinsichtlich der Zuordnung von reversiblen und irreversiblen Verformungen zu den Teiltensoräquivalenten. Entsprechend den Versuchsergebnissen ändert sich die Kompressibilität des Porenbetons belastungsabhängig. Bereits kurzzeitige Überlastungen oberhalb der experimentell ermittelten Dauerstandgrenze sind von signifikanten Änderungen der Kompressionssteifigkeit begleitet. Das qualitative Tragverhalten des Porenbetons, das bei Beanspruchungen oberhalb der Dauerstandfestigkeit grundsätzliche Änderungen erfährt, lässt sich so bereits im Kurzzeitversuch abgrenzen. Zusätzliche Auswertungen für Normalbeton und selbstverdichtenden hochfesten Beton weisen auf analoges Verhalten hin.

Auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen werden Konzepte vorgestellt, mit denen die Dauerstandfestigkeit im Kurzzeitversuch, das heißt mit einer Versuchsdauer von wenigen Stunden, prognostiziert werden kann. Damit können Untersuchungen zur Dauerstandfestigkeit, die eine grundlegende Größe zur Beurteilung der Tragfähigkeit darstellt, routinemäßig durchgeführt werden.

Abstract

This thesis is concerned with the behaviour of autoclaved aerated concrete (AAC) when it is subjected to uniaxial compressive loads. The objective is to ascertain the relationship between textural changes, macroscopic stress-strain relations and the sustained load strength of the material itself. Throughout the thesis, the sustained load strength is considered as a basic threshold level, i.e. as the boundary between stable and unstable load-bearing behaviour.

First, the effect of textural changes on the stress-strain behaviour was analysed on a theoretical basis with the aid of mechanical models. Based on the results, experimental tests were then planned. Short-term as well as long-term tests were carried out using cylindrical specimens made of AAC. Three different types of AAC were tested. Different load histories were used: monotonically increased loads and low-cycle loads with the load level increased step by step.

Within the context of the test data analysis, three-dimensional textural responses are taken into account. Uniaxial loading is regarded as a special case of multi-axial loading. The decomposition of the stress tensor and strain tensor respectively opens up the opportunity to obtain more detailed information about elastic and inelastic material properties. It can be shown that compressibility of AAC undergoes load-dependent changes. Even short-term overloads lead to significant textural changes; these can be detected by analysing the bulk modulus. On this basis, it is possible to give clear statements about the sustained load strength of AAC. Additional tests carried out on normal-strength concrete and self-compacting concrete display similar behaviour.

This study outlines a way of predicting sustained load strength on a short-term basis. As a result, it will be possible to carry out routine investigations into the sustained load strength in the future.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Massivbau I der Bauhaus-Universität Weimar. In dieser Zeit wirkte ich unter anderem am Sonderforschungsbereich 524 „Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken“ sowie an Forschungsvorhaben der Porenbetonindustrie mit.

Für die fachlichen Anregungen und die vielen wertvollen Gespräche möchte ich mich beim Leiter der Professur für Massivbau I, meinem Betreuer

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Erich Raue

herzlich bedanken. Für die Bereitschaft zur Übernahme der Koreferate danke ich herzlich Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Rautenstrauch und Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach.

Wesentliche Fragestellungen und Impulse für die Dissertation sind aus der Zusammenarbeit mit den Vertretern der Porenbetonindustrie entstanden. Besonderer Dank gebührt in diesem Zusammenhang Herrn Dr.-Ing. Peter Langer und Herrn Georg Flassenberg.

Mein Dank gilt außerdem meinen Kollegen der Professur für Massivbau I für die gewährte Unterstützung. Besonders hervorheben möchte ich die freundschaftliche, von Sachkompetenz und Hilfsbereitschaft geprägte Zusammenarbeit mit Thorsten Heidolf. Für die Unterstützung bei der Durchführung der zahlreichen und langwierigen experimentellen Untersuchungen und die angenehme Zusammenarbeit soll ebenso den Kollegen der Versuchstechnischen Einrichtung (VTE) der Bauhaus-Universität Weimar sowie meinen ehemaligen Diplomanden, Kay-Uwe Gruner und Nicole Eggert, Dank gesagt werden.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Freunden und meiner Familie, insbesondere meiner Lebensgefährtin Alexandra Römhild, für die im Privatleben jederzeit gewährte Unterstützung bedanken.

Enrico Tartsch

Weimar, Februar 2008

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VII
Kapitel 1 Einleitung	1
1.1 Einführung und Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
Kapitel 2 Kontinuumsmechanische Grundlagen	5
2.1 Räumlicher Spannungszustand	5
2.1.1 Hauptnormalspannungen	7
2.1.2 Oktaederspannungen	8
2.1.3 Hydrostatische und deviatorische Spannungen	8
2.1.4 Zylindrische Invarianten des Spannungstensors	9
2.2 Räumlicher Verformungszustand	11
2.2.1 Hauptdehnungen	11
2.2.2 Weitere Invarianten des Dehnungstensors	12
2.3 Konstitutive Beziehungen	13
2.4 Formänderungsarbeit	14
Kapitel 3 Mechanisches Verhalten von Normalbeton und Porenbeton	17
3.1 Herstellung von Normalbeton und Porenbeton	17
3.2 Materialwiderstand	18
3.2.1 Monoton ansteigende Beanspruchung	18
3.2.2 Ruhende Belastung	21
3.2.3 Zyklisch eingetragene Belastung	25
3.3 Verformungen und Steifigkeit	26
3.3.1 Temperatur- und Schwindverformungen	27
3.3.2 Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge und abgeleitete Größen	28
3.3.2.1 Monoton ansteigende Beanspruchung	28
3.3.2.2 Ruhende Belastung	32
3.3.2.3 Zyklisch eingetragene Belastung	33
3.4 Tragwirkung und Strukturänderungen	34
3.4.1 Tragwirkung und Bruchverhalten	35
3.4.2 Phasen struktureller Änderungen, Schwellenwerte	37
Kapitel 4 Mechanische Modelle	41
4.1 Grundelemente	41

4.2	<i>Elementgruppen</i>	43
4.2.1	Feder-Frictions-Modelle.....	43
4.2.2	Feder-Dämpfer-Modelle.....	44
4.2.3	Kombiniertes Modell für einachsige Untersuchungen	48
4.3	<i>Ebene und räumliche Modellvorstellungen</i>	49
4.4	<i>Zusammenfassende Bemerkungen</i>	51
Kapitel 5	Experimentelle Untersuchungen und Versuchsauswertung	53
5.1	<i>Charakteristik der Versuche</i>	53
5.1.1	Probekörper, Versuchsaufbau, Messtechnik	53
5.1.2	Versuchsprogramm	56
5.1.2.1	Standardversuche zur Bestimmung der Kurzzeitdruckfestigkeit	56
5.1.2.2	Weitere Versuche mit monoton gesteigerter Beanspruchung	57
5.1.2.3	Versuche mit ruhender Belastung	57
5.1.2.4	Versuche mit niederzyklisch gesteigerter Belastung.....	57
5.2	<i>Versuchsergebnisse</i>	58
5.2.1	Hinweise zur Auswertung, Begriffsbestimmungen.....	59
5.2.2	Feuchtegehalt, Trockenrohdichte, Schwindverhalten	62
5.2.3	Materialwiderstand.....	64
5.2.3.1	Kurzzeitdruckfestigkeit	64
5.2.3.2	Weitere Kurzzeitdruckfestigkeitswerte	64
5.2.3.3	Zeitstandfestigkeit, Dauerstandfestigkeit	65
5.2.3.4	Widerstand bei wiederholter Belastung.....	69
5.2.4	Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge, abgeleitete Größen	71
5.2.4.1	Monoton ansteigende Beanspruchung.....	71
5.2.4.2	Ruhende Belastung.....	78
5.2.4.3	Niederzyklisch gesteigerte Belastung.....	85
5.2.5	Bruchbilder	94
5.3	<i>Interpretation der Versuchsergebnisse</i>	96
5.3.1	Schwindverhalten	96
5.3.2	Tragverhalten.....	98
5.3.2.1	Dauerstandfestigkeit.....	98
5.3.2.2	Monoton ansteigende Beanspruchung.....	99
5.3.2.3	Ruhende Belastung.....	100
5.3.2.4	Niederzyklisch gesteigerte Belastung.....	102
5.3.3	Bruchverhalten	105
5.3.4	Empfehlungen für Untersuchungskonzepte.....	105
5.4	<i>Verifikation der Hypothesen an anderen Betonarten</i>	108
Kapitel 6	Schlussfolgerungen	111
	Literaturverzeichnis.....	115
	Anhang	123

Symbolverzeichnis

Bezeichnungen, die nicht in der Liste aufgeführt sind, werden im laufenden Text erläutert.

Allgemeine Größen und Bezeichnungen

l	Länge
d	Durchmesser
A	Fläche
V	Volumen
m	Masse
μ_m	massebezogener Feuchtegehalt
t, τ	Zeit, Zeitpunkt
t_K	Versuchsdauer
v	Geschwindigkeit
e	Eulersche Zahl
n_x, n_y, n_z	Richtungskosinus
l	Normaleneinheitsvektor
J	Hauptinvarianten
ω	Winkel in der Deviatorebene
i, j	Variablen
N	Lastspielzahl

Kräfte, Spannungen

F	Kraft
p	Spannungsvektor
S	Spannungstensor
S_m	Spannungskugeltensor
S'	Spannungsdeviator
σ	Normalspannung
τ	Schubspannung
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungen
σ_m	mittlere Spannung
σ_{okt}	Oktaedernormalspannung
τ_{okt}	Oktaederschubspannung
σ_H	sphärische Spannung (Haigh-Westergaard)
σ_D	deviatorische Spannung (Haigh-Westergaard)
σ_e	effektive Spannung
σ^*, σ^{**}	allgemeine Grenzspannungen
σ_{max}	Oberspannung (Schwingbelastung)

σ_{min}	Unterspannung (Schwingbelastung)
σ_r	Schwingbreite (Schwingbelastung)

Verformungsparameter

D	Dehnungstensor
D_m	Dehnungskugeltensor
D'	Dehnungsdeviator
ε	Dehnung
γ	Gleitung
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	Hauptdehnungen
ε_{okt}	Oktaederdehnung
γ_{okt}	Oktaedergleitung
ε_m	mittlere Dehnung
θ	Volumendehnung
ε_H	sphärische Dehnung (Haigh-Westergaard)
ε_D	deviatorische Dehnung (Haigh-Westergaard)
ε_e	effektive Dehnung
ε_S	Schwinddehnung
$\varepsilon_{S,0}$	Endschwindmaß
φ_{∞}	Endkriechzahl

Konstitutive Parameter, Energie

ν	Querdehnzahl
η	Viskositätszahl
E	Elastizitätsmodul
G	Gleitmodul
K	Kompressionsmodul
W_a	Formänderungsarbeit
U_s	spezifische Formänderungsenergie
U_V	Formänderungsenergie
W_{el}	elastisch gespeicherte Energie
D_D	Dämpfungsenergie
D_S	für irreversible Strukturänderungen dissipierte Energie

f_{cm}	mittlere Kurzzeitdruckfestigkeit	q	quer (senkrecht zur Lastrichtung)
$f_{cm,28}$	mittlere 28-Tage-Kurzzeitdruckfestigkeit	t, τ	Zeitpunkte
β_{cc}	Parameter zur Berücksichtigung der Nacherhärtung	pl	irreversibel, plastisch
$\beta_{c,sus}$	Parameter zur Berücksichtigung der Entfestigung unter Dauerlast	Einheiten	
$f_{cm,sus}$	mittlere Zeitstanddruckfestigkeit	mm, cm, m	Länge
f_{ctm}	mittlere Kurzzeitzugfestigkeit	mm ² , cm ² , m ²	Fläche
a, b, n	Koeffizienten	cm ³	Volumen
$\eta_1 \dots \eta_3$	Koeffizienten	g	Masse
Indizes		g/cm ³	Dichte
x, y, z, ξ , η , ζ	Richtungsbezeichnungen für Vektoren	s, min, h, d	Zeit
S	Sekante (Steifigkeit), Schwinden (Verformung)	°C, K	Temperatur, Temperaturdifferenz
T	Tangente	Hz	Frequenz
l	längs (in Lastrichtung)	N, kN	Kraft
		N/mm ²	Spannung, Elastizitäts-, Kompressions- und Gleitmodul
		mm/m	Dehnung

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Einführung und Motivation

Im Planungsprozess von Bauwerken sind zahlreiche Entscheidungen zu treffen, mit denen die Anforderungen und die Eigenschaften des zu errichtenden Bauwerkes bzw. einzelner Bauwerksteile aufeinander abgestimmt werden sollen. Wesentliche Kriterien sind durch Anforderungen an das Tragverhalten und die chemische Beständigkeit sowie bauphysikalische Forderungen an den Wärme- und Schallschutz vorgegeben, wobei je nach Einsatzgebiet einzelne Kriterien für die Wahl des zu verwendenden Baumaterials bestimmend sein können. Dies spiegelt sich in der Vielzahl der entwickelten Materialien und Bauweisen wider.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Tragverhalten von *dampfgehärtetem Porenbeton* analysiert. Dampfgehärteter Porenbeton ist ein industriell hergestellter Baustoff, der in Form von vorgefertigten, bewehrten oder unbewehrten Elementen auf der Baustelle eingesetzt wird. Die Materialeigenschaften des dampfgehärteten Porenbetons sind durch die Mischungszusammensetzung und den Herstellungsprozess, der nach der Autoklavierung abgeschlossen ist, vorgegeben.

Aus der Sicht der Tragwerksplanung ist die *einachsige Druckfestigkeit* ein maßgeblicher Parameter zur Beurteilung und Klassifikation der Betone. Sie wird als Bruchspannung an Probekörpern bestimmt, die monoton ansteigenden, einachsigen und zentrischen Druckbeanspruchungen ausgesetzt werden. Ein Vorteil dieses Beanspruchungsregimes besteht in der vergleichsweise einfachen Handhabbarkeit und der Eignung für routinemäßige Untersuchungen. Zu beachten ist jedoch, dass der so bestimmte Widerstand eine Kurzzeitfestigkeit darstellt, d. h. die zugeordnete Maximalspannung nicht dauerhaft ertragen werden kann.

Für das Tragverhalten von Beton sind zeitabhängige Festigkeits- und Formänderungseigenschaften charakteristisch. Bei der Beurteilung des Bruchwiderstandes von Beton muss deshalb zusätzlich die Zeit einbezogen werden. Im Allgemeinen sind zwei Prozesse zu berücksichtigen, die einen entgegengesetzten Einfluss auf den Bruchwiderstand des Betons haben: die Nacherhärtung und die beanspruchungsbedingte Entfestigung.

Mechanische Beanspruchungen bewirken strukturelle Änderungen, die bei Beton durch Mikrozerstörungen, Mikrorisse und Makrorisse [Berg et al. 1971] in Erscheinung treten. Diese Strukturänderungen haben einen signifikanten Einfluss auf das makroskopische Last-Verformungs-Verhalten. Das Ausmaß der Strukturänderungen wird durch die Dauer und die Intensität der Beanspruchungen vorgegeben.

Beanspruchungen hoher Intensität können lediglich für kurze Zeitdauer vom Beton aufgenommen werden. Demgegenüber kann ein zeitabhängiges Versagen ausgeschlossen werden, wenn die Beanspruchungsintensität nicht oberhalb eines Schwellenwertes, der *Dauerstandfestigkeit*, liegt.

Die Nacherhärtung, die unter anderem bei Normalbeton auftritt, bewirkt im Gegensatz zu den Mechanismen der Entfestigung eine zeitabhängige Zunahme des Widerstandsvermögens. So kann nach einer Belastungsdauer von wenigen Tagen, der kritischen Standzeit, davon ausgegangen werden, dass das gewählte Lastniveau bei hinreichendem Nacherhärtungspotential für unbegrenzte Zeitdauer vom Material ertragen wird, weil die Nacherhärtung die weitere Festigkeitsentwicklung dominiert. Da bei dampfgehärtetem Porenbeton keine Nacherhärtung festgestellt werden kann, ist der experimentelle Nachweis der Dauerstandfestigkeit mit einem erheblich größeren Zeitaufwand verbunden, was für routinemäßige Festigkeitsprüfungen nicht praktikabel ist.

Seit Jahrzehnten gibt es vielfältige wissenschaftliche Bemühungen und Ansätze, um vom Spannungs-Dehnungs-Verhalten unter kurzzeitiger Belastung auf das Langzeittragverhalten und die Dauerstandfestigkeit zu schließen. Der Bedarf und die praktische Relevanz von entsprechenden *Kurzzeitprüfverfahren* liegen unter anderem darin begründet, dass der Einfluss von Modifikationen bezüglich der Mischungszusammensetzung und der Herstellung einzelner Betonarten auf das Langzeittragverhalten binnen kurzer Zeit beurteilt werden kann. Eine besondere Bedeutung erlangen derartige Verfahren somit zum Beispiel im Zuge der Einführung neuer Bindemittel, Gesteinskörnungen, Zusatzstoffe und Zusatzmittel. Eine experimentell und theoretisch allgemein begründete und anerkannte wissenschaftliche Basis hierfür liegt jedoch noch nicht vor.

Unumstritten ist, dass das Versagen von einachsig druckbeanspruchtem Normalbeton primär auf Risse und damit auf lokal auftretende Zugbeanspruchungen zurückzuführen ist. Wird davon ausgegangen, dass mechanische Beanspruchungen je nach Intensität mehr oder weniger ausgeprägte strukturelle Änderungen bewirken, kann die Dauerstandfestigkeit als Grenze zum *instabilen Rissfortschritt* aufgefasst werden. Unter der Voraussetzung, dass keine maßgeblichen chemischen Änderungen der Struktur auftreten, besteht ein Ansatzpunkt für ein Kurzzeitprüfverfahren zur Prognostizierung der Dauerstandfestigkeit somit darin, anhand des vom Rissfortschritt abhängigen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens auf Strukturänderungen zu schließen und damit Zustände oberhalb der Dauerstandschwelle abzugrenzen. Die Analyse des Einflusses der Rissbildung auf das mechanische Materialverhalten ist deshalb ein wesentlicher Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit.

Im Gegensatz zu Normalbeton liegen vergleichsweise wenige Untersuchungsergebnisse zum Tragverhalten von dampfgehärtetem Porenbeton vor. Zu wesentlichen Aspekten des Tragverhaltens, insbesondere auch der Dauerstandfestigkeit des dampfgehärteten Porenbetons, werden unterschiedliche Auffassungen vertreten. Die einheitliche Beurteilung des Tragverhaltens wird dadurch erschwert, dass mechanisch bedingte Strukturänderungsmechanismen im dampfgehärteten Porenbeton nicht eindeutig geklärt sind. Dem Verständnis dieser Mechanismen und Prozesse wird im Rahmen der Interpretation von Strukturreaktionen besondere Bedeutung beigemessen.

An der Professur Massivbau I, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau (IKI) der Bauhaus-Universität Weimar wurden in den vergangenen Jahren umfangreiche Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von bewehrtem und unbewehrtem Porenbeton durchgeführt. Die Versuche an unbewehrtem Porenbeton beziehen sich unter anderem auf das Verhalten unter Teilflächenbelastung [Raue & Ebel 1995, Ebel 1999], das Verhalten unter mehrachsigen Beanspruchungen [Raue et al. 2000a], das Ent-

festigungsverhalten und die Bruchenergie [Raue et al. 2000b] sowie das Ermüdungsverhalten [Raue et al. 2000c, Raue & Tartsch 2005]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Untersuchungen vorgestellt, mit denen der Zusammenhang von mechanischer Beanspruchung und Strukturantwort unter dem Aspekt der Dauerstandfestigkeit geklärt werden soll.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Das Hauptziel der im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen ordnet sich in das vorgenannte Anliegen ein, den Einfluss beanspruchungsbedingter Strukturänderungen auf das Tragverhalten von dampfgehärtetem Porenbeton zu analysieren, um eine *Bewertung der Dauerstandfestigkeit auf der Grundlage von Kurzzeitversuchen* vornehmen zu können. Die Zielsetzung soll in 4 Schritten erreicht werden.

Im Schritt 1 wird anhand von Ergebnissen vorangegangener Untersuchungen analysiert, welchen Einfluss mechanische Beanspruchungen auf das Tragverhalten von Normalbeton und dampfgehärtetem Porenbeton haben. In diesem Zusammenhang werden grundlegende Fragen zur inneren Tragwirkung und zum Bruchverhalten diskutiert.

Im Schritt 2 wird anhand mechanischer Modelle gezeigt, welche Parameter bzw. Eigenschaften für die Langzeittragfähigkeit maßgeblich sind. Daraus wird ein Versuchskonzept abgeleitet, auf dessen Grundlage die experimentelle Erfassung und Bewertung dieser Eigenschaften möglich ist.

Die praktische Umsetzung erfolgt in Schritt 3. Es werden experimentelle Untersuchungen an unbewehrten Probekörpern aus dampfgehärtetem Porenbeton durchgeführt, um die Parameter Kurzzeitfestigkeit und Dauerstandfestigkeit zu bestimmen. Drei Serien aus unterschiedlichen Porenbetonwerken werden untersucht. Zusätzlich werden Kurzzeitversuche mit zyklischer Belastung durchgeführt und die Ergebnisse analysiert, wobei die anhand der theoretischen Voruntersuchungen erarbeiteten Sachverhalte sowohl im Zuge der Versuchsplanung als auch der Analyse der Messdaten berücksichtigt werden. Als Basis zur Beurteilung charakteristischer Übergänge im Materialverhalten wird die experimentell bestimmte Dauerstandfestigkeit herangezogen. Um eine umfassende Auswertung der Materialreaktionen zu gewährleisten, werden die Verformungen in alle Raumrichtungen einbezogen.

Im Schritt 4 werden die aufgestellten Arbeitshypothesen an anderen Betonarten verifiziert. Hierfür werden Messdaten von Versuchen herangezogen, die an Normalbeton und selbstverdichtendem hochfestem Beton durchgeführt worden sind.

Die vorgenannten Schritte zur Umsetzung der Zielstellung bilden die Grundlage für die Strukturierung der Arbeit. Die vorliegende Arbeit ist in 6 Kapitel gegliedert.

In *Kapitel 1*, der Einleitung, wurde bereits die Bedeutung der Dauerstandfestigkeit für die Bemessung von Tragwerken dargelegt und gezeigt, dass ein praktisches Bestreben besteht, diesen Materialparameter auf der Grundlage von routinemäßigen Kurzzeitversuchen zu ermitteln.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen bleiben nicht auf die Analyse der einachsigen Druckspannungs-Längsstauchungs-Beziehung beschränkt, sie stützen sich auf die dreidimensionalen Ansätze der Spannungs- und Deformationstheorie. Die grundlegenden konti-

numsmechanischen Zusammenhänge und elementare konstitutive Beziehungen werden in *Kapitel 2* dargelegt und erörtert.

In *Kapitel 3* wird das mechanische Verhalten von Normalbeton und dampfgehärtetem Porenbeton gegenüberstellend analysiert. Damit soll gleichzeitig geklärt werden, inwiefern einzelne Ergebnisse verallgemeinerungsfähig sind. Ferner werden einzelne Prüfeinflüsse als Aspekte für die Planung und Durchführung der eigenen Versuche diskutiert.

Der Zusammenhang zwischen Strukturänderungen und dem makroskopisch zu ermittelnden Spannungs-Dehnungs-Verhalten wird in *Kapitel 4* mit Hilfe mechanischer Modelle theoretisch untersucht. Auf diese Modellvorstellungen stützt sich die methodische Ausrichtung für die experimentellen Untersuchungen.

In *Kapitel 5* werden die eigenen experimentellen Untersuchungen vorgestellt und die Ergebnisse interpretiert. Ferner werden Ergebnisse von Versuchen an Normalbeton und selbstverdichtendem hochfestem Beton vorgestellt, um die Leistungsfähigkeit und Übertragbarkeit der vorgeschlagenen Untersuchungsmethode mit Bezug zur Dauerstandfestigkeit aufzuzeigen.

In *Kapitel 6* werden die wesentlichen Schlussfolgerungen der Arbeit zusammengefasst.

Im Hauptteil der Arbeit sind die Versuchsergebnisse in Form von Übersichten angegeben. Sie sind im *Anhang* probekörperweise dargestellt, um Lastgeschichte und Materialreaktion im Detail zuordnen zu können.

Kapitel 2

Kontinuumsmechanische Grundlagen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll das Tragverhalten von einachsig druckbeanspruchtem Porenbeton unter Berücksichtigung des mehrachsigen Deformationsverhaltens der Probekörper analysiert werden. Die Grundlagen zur Beschreibung beliebiger Spannungs- und Deformationszustände unter Verwendung der Invarianten des allgemeinen Spannungs- bzw. Dehnungstensors werden in diesem Kapitel erläutert. Darauf aufbauend werden elementare konstitutive Beziehungen beschrieben.

Für die Darstellung mehrachsiger Spannungs- und Verformungszustände gibt es zahlreiche Möglichkeiten [Schlechte 1981, Życzkowski 1981, Backhaus 1983, Skrzypek & Hetnarski 1993, Altenbach et al. 1995, Mang & Hofstetter 2000, Wittenburg & Pestel 2001, Gross & Seelig 2001]. Im Sinne der Arbeit werden die Verformungen in Dichteänderungs- und Verzerrungskomponenten, d. h. in Volumenänderungen und Gestaltänderungen zerlegt.

Mit Hinblick auf das Materialverhalten der Betone wird die Gültigkeit der kontinuumsmechanischen Ansätze vorausgesetzt. Es wird von einem makroskopisch homogenen Kontinuum ausgegangen, das kleinen Deformationen ausgesetzt wird. Ferner wird isotropes Materialverhalten unterstellt, die Richtungen der Hauptspannungs- und Hauptdehnungsachsen sind identisch.

2.1 Räumlicher Spannungszustand

Eine von außen auf einen Körper wirkende mechanische Beanspruchung ruft im Inneren des Körpers Kräfte hervor. Das Verhältnis von dem auf ein Schnittflächenelement wirkenden inneren Kraftvektor ΔF zu dem Flächeninhalt der Schnittfläche ΔA ist als Spannungsvektor p definiert.

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (2.1)$$

Im Körperinneren sind die Spannungen im Allgemeinen ungleich verteilt und können lediglich im infinitesimalen Bereich als konstant angesehen werden. Der Spannungszustand eines Körperpunktes

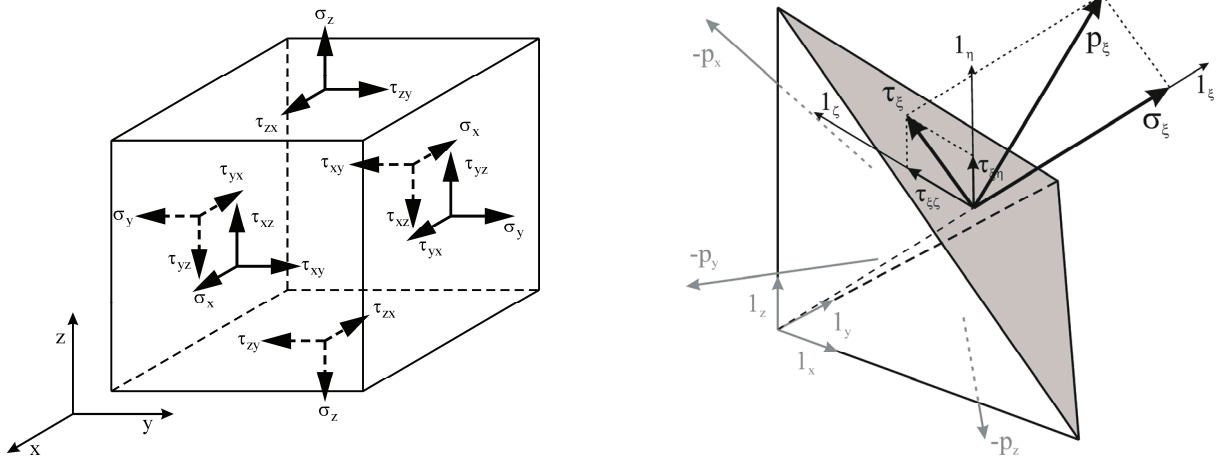


Abb. 2.1: Spannungen am infinitesimal kleinen Quader und am infinitesimal kleinen Tetraeder

ist unter Vernachlässigung der Volumenkräfte, die gegenüber den Oberflächenkräften von höherer Ordnung klein sind, eindeutig durch neun Spannungskomponenten charakterisiert (Abb. 2.1).

Aus dem Momentengleichgewicht der an einem infinitesimal kleinen Quader angreifenden Oberflächenkräfte kann die Gleichheit zugeordneter Schubspannungen abgeleitet werden

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}, \quad \tau_{zx} = \tau_{xz}. \quad (2.2)$$

Damit genügen sechs Spannungskomponenten zur eindeutigen Beschreibung des Spannungszustandes. Die Komponenten werden im symmetrischen Spannungstensor S zusammengefasst.

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

In einem beliebigen, gegen das x, y, z -System gedrehten ξ, η, ζ -Koordinatensystem (Abb. 2.1) ist der Vektor l_ξ durch die Richtungskosinus n_x, n_y, n_z bestimmt.

$$l_\xi = n_x l_x + n_y l_y + n_z l_z \quad (2.4)$$

Diese erfüllen die Bedingung

$$n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1. \quad (2.5)$$

Mit Hilfe von Koordinatentransformationen lassen sich die Normal- und Schubspannungen in beliebigen Schnitttrichtungen bestimmen.

2.1.1 Hauptnormalspannungen

Für die Hauptspannungsrichtungen wird gefordert, dass die Schubspannungen null werden. Hierfür wird die in Abb. 2.1 dargestellte Schnittebene derart im Raum platziert, dass der Spannungsvektor p_ξ normal auf dieser steht und nach Größe und Richtung gleich σ_ξ / l_ξ ist. Es gilt

$$p_\xi - \sigma l_\xi = 0, \quad (2.6)$$

wobei σ die noch unbekannte Normalspannung ist. Für die Richtungskosinus gelten die Gleichungen

$$\begin{aligned} (\sigma_x - \sigma)n_x &+ \tau_{xy}n_y + \tau_{zx}n_z &= 0 \\ \tau_{xy}n_x &+ (\sigma_y - \sigma)n_y + \tau_{yz}n_z &= 0 \\ \tau_{zx}n_x &+ \tau_{yz}n_y + (\sigma_z - \sigma)n_z &= 0. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Für diese existieren nur dann nichttriviale Lösungen, wenn die Determinante der Koeffizientenmatrix gleich null ist

$$\begin{vmatrix} (\sigma_x - \sigma) & \tau_{xy} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - \sigma) & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & (\sigma_z - \sigma) \end{vmatrix} = 0. \quad (2.8)$$

Ausführlich lautet die Bestimmungsgleichung

$$-\sigma^3 + J_{1\sigma}\sigma^2 - J_{2\sigma}\sigma + J_{3\sigma} = 0 \quad (2.9)$$

mit

$$\begin{aligned} J_{1\sigma} &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ J_{2\sigma} &= \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \\ J_{3\sigma} &= \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - (\sigma_x\tau_{yz}^2 + \sigma_y\tau_{zx}^2 + \sigma_z\tau_{xy}^2) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Die drei Wurzeln σ_1 , σ_2 und σ_3 der Gleichung 2.9 sind die Hauptnormalspannungen. Diese Werte sind unabhängig von der Lage des Koordinatensystems, in dem der Spannungszustand beschrieben wird, die Hauptnormalspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 sind Invarianten des Spannungstensors.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{3}J_{1\sigma} + \frac{2}{3}\sqrt{J_{1\sigma}^2 - 3J_{2\sigma}} \cdot \cos \omega_\sigma \\ \sigma_2 &= \frac{1}{3}J_{1\sigma} + \frac{2}{3}\sqrt{J_{1\sigma}^2 - 3J_{2\sigma}} \cdot \cos\left(\omega_\sigma - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sigma_3 &= \frac{1}{3}J_{1\sigma} + \frac{2}{3}\sqrt{J_{1\sigma}^2 - 3J_{2\sigma}} \cdot \cos\left(\omega_\sigma + \frac{2}{3}\pi\right) \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\text{mit } \omega_\sigma = \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{2J_{1\sigma}^3 - 9J_{1\sigma}J_{2\sigma} + 27J_{3\sigma}}{2(J_{1\sigma}^2 - 3J_{2\sigma})^{3/2}} \right)$$

Für Spannungshypothesen werden die Hauptspannungen meist wie folgt geordnet

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3. \quad (2.12)$$

Um Gl. 2.9 zu genügen, müssen auch die Koeffizienten $J_{1\sigma}$, $J_{2\sigma}$ und $J_{3\sigma}$ (Gl. 2.10) invariant sein. Diese werden als Hauptinvarianten des Spannungstensors bezeichnet.

2.1.2 Oktaederspannungen

Als Oktaederebene wird die Schnittebene bezeichnet, deren Normalenvektor mit der Raumdiagonalen im System der Hauptachsen zusammenfällt, Abb. 2.2. Alle Richtungskosinus haben den gleichen Betrag

$$n_x = \pm\sqrt{\frac{1}{3}}, \quad n_y = \pm\sqrt{\frac{1}{3}}, \quad n_z = \pm\sqrt{\frac{1}{3}}. \quad (2.13)$$

Im Raum der Hauptspannungen ergeben sich durch die Vorzeichen der Richtungskosinus acht Kombinationen, die jeweils eine Fläche des Oktaeders darstellen, Abb. 2.2. In allen Ebenen wirken dieselbe Oktaedernormalspannung σ_{okt} und Oktaederschubspannung τ_{okt}

$$\sigma_{okt} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (2.14)$$

$$\tau_{okt} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (2.15)$$

2.1.3 Hydrostatische und deviatorische Spannungen

Alternativ lässt sich der Spannungstensor S in einen volumenändernden Spannungskugeltensor S_m und einen gestaltändernden Spannungsdeviator S' zerlegen

$$S = S_m + S'. \quad (2.16)$$

Der Spannungskugeltensor S_m beschreibt einen isotropen Spannungsteilzustand mit drei gleichen Normalspannungen von der Größe der mittleren Spannung σ_m

$$S_m = \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

mit

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \quad (2.18)$$

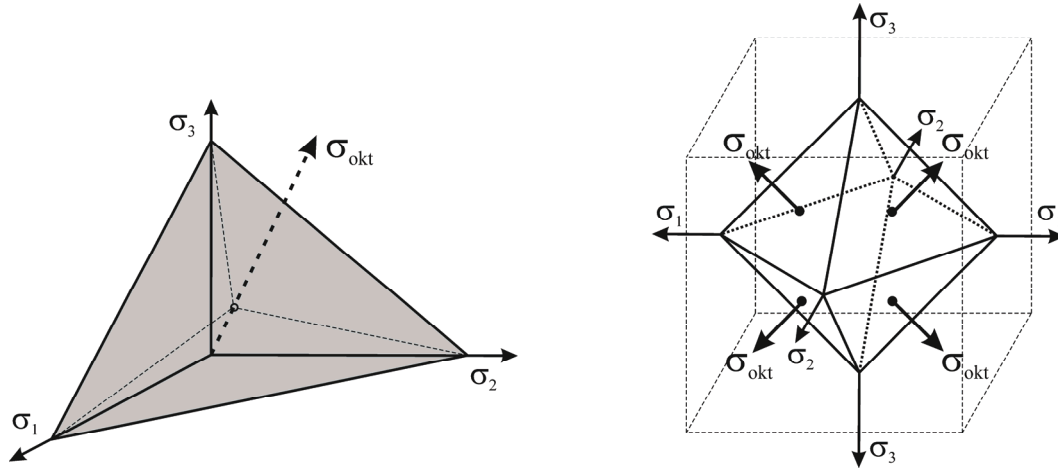


Abb. 2.2: Oktaedernormalspannung in der Oktaederebene und am Oktaeder

Die mittlere Spannung σ_m wird als hydrostatische Spannung bezeichnet. Für ein beliebiges Koordinatensystem ist der Spannungsdeviator

$$S' = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}\sigma_x - \frac{1}{3}(\sigma_y + \sigma_z) & \tau_{xy} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \frac{2}{3}\sigma_y - \frac{1}{3}(\sigma_z + \sigma_x) & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & \frac{2}{3}\sigma_z - \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

und im System der Hauptspannungen

$$S' = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}\sigma_1 - \frac{1}{3}(\sigma_2 + \sigma_3) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3}\sigma_2 - \frac{1}{3}(\sigma_3 + \sigma_1) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3}\sigma_3 - \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2) \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

Auf die Darstellung von Invarianten des Spannungsdeviators wird verzichtet. Zusammenstellungen zu den Invarianten sind z. B. in [Życzkowski 1981] enthalten.

2.1.4 Zylindrische Invarianten des Spannungstensors

Durch das Hauptachsensystem wird ein dreidimensionaler Spannungsraum definiert, in welchem sich der Spannungszustand durch einen Punkt abbilden lässt, Abb. 2.3. Die Lage des Punktes kann durch Zylinderkoordinaten, Haigh-Westergaard-Koordinaten, ausgedrückt werden. Die Achse des Zylinderkoordinatensystems fällt mit der hydrostatischen Achse zusammen. Die erste Zylinderkoordinate entspricht dem minimalen Abstand σ_H zwischen Koordinatenursprung und Deviatorebene

$$\sigma_H = \frac{1}{\sqrt{3}}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \quad (2.21)$$

Der Abstand zwischen dem Raumpunkt und der hydrostatischen Achse in der Deviatorebene ist σ_D , Gl. 2.22.

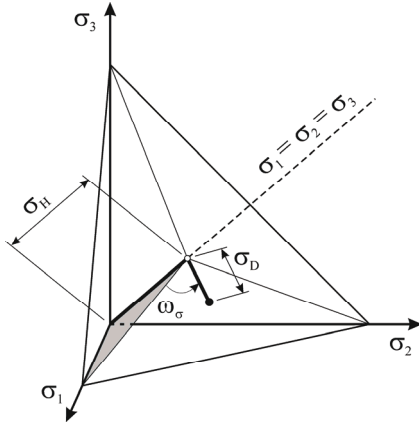


Abb. 2.3: Zylindrische Invarianten des Spannungstensors

$$\sigma_D = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.22)$$

Die Richtung in der Deviatorebene ist durch den Winkel ω_σ festgelegt. Als Bezugsbasis wird die von der hydrostatischen Achse und der ersten Hauptspannungsachse aufgespannte Ebene herangezogen. Der Winkel ist bestimmt durch

$$\omega_\sigma = \arcsin \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_D \sqrt{2}} \quad (2.23)$$

bzw.

$$\cos 3\omega_\sigma = \frac{12\sigma_1\sigma_2\sigma_3 - 3(\sigma_1^2\sigma_2 + \sigma_1\sigma_2^2 + \sigma_2^2\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3^2 + \sigma_3^2\sigma_1 + \sigma_3\sigma_1^2) + 2(\sigma_1^3 + \sigma_2^3 + \sigma_3^3)}{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1)^{3/2}}. \quad (2.24)$$

Die Teiltensoräquivalente σ_H und σ_D lassen sich durch Modifikation der Koeffizienten unmittelbar in die Oktaederspannungen (Gl. 2.14, 2.15) überführen

$$\sigma_{\text{okt}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_H, \quad (2.25)$$

$$\tau_{\text{okt}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_D. \quad (2.26)$$

Die Invariante ω_σ bleibt unverändert, sie beschreibt die Wirkungsrichtung der Oktaederschubspannung.

Anstelle der Invarianten σ_H und σ_D werden in der Plastizitätstheorie häufig die dazu proportionalen Invarianten σ_m und σ_e verwendet. Die mittlere Spannung σ_m ergibt sich aus Gl. 2.18. Die Invariante σ_e wird als effektive Spannung bzw. Spannungsintensität bezeichnet und ist so festgelegt, dass die Spannung beim einachsigen Versuch gerade der Spannungsintensität σ_e entspricht.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.27)$$

Auf den Winkel ω_σ hat die Modifikation der Koeffizienten keinen Einfluss.

2.2 Räumlicher Verformungszustand

Durch Deformation eines festen Körpers werden im Körperinnern Veränderungen der Abstände einzelner materieller Punkte untereinander hervorgerufen. Der Verformungszustand kann an jedem Punkt eindeutig durch die in D enthaltenen Komponenten beschrieben werden

$$D = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix}. \quad (2.28)$$

Die Hauptdiagonalglieder von D geben die relativen Längenänderungen, die als Dehnungen ε_i definiert sind, und die Glieder außerhalb der Diagonalen die halben Gleitungen an. Die Gleitungen γ_{ij} stellen die durch die Deformation herbeigeführten Winkeländerungen eines Volumenelementes dar, einander zugeordnete Gleitungen sind gleich:

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx}, \quad \gamma_{yz} = \gamma_{zy}, \quad \gamma_{zx} = \gamma_{xz}. \quad (2.29)$$

2.2.1 Hauptdehnungen

In den Dehnungshaupttrichtungen nehmen die Normaldehnungen stationäre Werte an und die Gleitungen werden null. Die Ermittlung der Hauptdehnungen erfolgt in Analogie zur Ermittlung der Hauptspannungen durch Drehtransformation. Die Bestimmungsgleichung lautet

$$-\varepsilon^3 + J_{1\varepsilon}\varepsilon^2 - J_{2\varepsilon}\varepsilon + J_{3\varepsilon} = 0 \quad (2.30)$$

mit

$$\begin{aligned} J_{1\varepsilon} &= \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \\ J_{2\varepsilon} &= \varepsilon_x\varepsilon_y + \varepsilon_y\varepsilon_z + \varepsilon_z\varepsilon_x - \frac{1}{4}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \\ J_{3\varepsilon} &= \varepsilon_x\varepsilon_y\varepsilon_z + \frac{1}{4}\gamma_{xy}\gamma_{yz}\gamma_{zx} - \frac{1}{4}(\varepsilon_x\gamma_{yz}^2 + \varepsilon_y\gamma_{zx}^2 + \varepsilon_z\gamma_{xy}^2) \end{aligned} \quad (2.31)$$

Die drei Wurzeln der kubischen Gleichung sind reell und stellen die Hauptdehnungen ε_1 , ε_2 und ε_3 dar:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1 &= \frac{1}{3} J_{1\varepsilon} + \frac{2}{3} \sqrt{J_{1\varepsilon}^2 - 3J_{2\varepsilon}} \cdot \cos \omega_\varepsilon \\
\varepsilon_2 &= \frac{1}{3} J_{1\varepsilon} + \frac{2}{3} \sqrt{J_{1\varepsilon}^2 - 3J_{2\varepsilon}} \cdot \cos\left(\omega_\varepsilon - \frac{2}{3}\pi\right) \\
\varepsilon_3 &= \frac{1}{3} J_{1\varepsilon} + \frac{2}{3} \sqrt{J_{1\varepsilon}^2 - 3J_{2\varepsilon}} \cdot \cos\left(\omega_\varepsilon + \frac{2}{3}\pi\right) \\
\text{mit } \omega_\varepsilon &= \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{2J_{1\varepsilon}^3 - 9J_{1\varepsilon}J_{2\varepsilon} + 27J_{3\varepsilon}}{2(J_{1\varepsilon}^2 - 3J_{2\varepsilon})^{3/2}} \right).
\end{aligned} \tag{2.32}$$

Die Koeffizienten $J_{1\varepsilon}$, $J_{2\varepsilon}$ und $J_{3\varepsilon}$ werden als Hauptinvarianten des Verformungs- bzw. Dehnungstensors bezeichnet. Diese sind wie die Hauptdehnungen ε_1 , ε_2 und ε_3 invariant gegenüber Drehtransformation. Die Hauptdehnungen ε_1 , ε_2 und ε_3 werden im Zusammenhang mit Dehnungshypothesen folgendermaßen geordnet

$$\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3. \tag{2.33}$$

2.2.2 Weitere Invarianten des Dehnungstensors

Analog zum Spannungstensor können weitere Invarianten des Dehnungstensors ermittelt werden.

Die Dehnungen und Gleitungen sind in allen Ebenen des Oktaeders, vgl. Abb. 2.2, gleich groß und betragen

$$\varepsilon_{\text{okt}} = \frac{1}{3} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3), \tag{2.34}$$

$$\gamma_{\text{okt}} = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}. \tag{2.35}$$

Weiterhin kann die Gesamtdeformation eines Elementes durch eine Volumenänderung und eine Gestaltänderung dargestellt werden. Der Dehnungstensor D wird in einen Dehnungskugeltensor D_m und einen Dehnungsdeviator D' aufgespalten

$$D = D_m + D'. \tag{2.36}$$

Die Volumenänderung wird durch den sphärischen Tensor D_m

$$D_m = \begin{bmatrix} \varepsilon_m & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_m & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_m \end{bmatrix} \tag{2.37}$$

mit der mittleren Dehnung ε_m

$$\varepsilon_m = \frac{1}{3} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) = \frac{1}{3} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) = \frac{\theta}{3} \tag{2.38}$$

beschrieben. Die Volumendehnung $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ des Elementes entspricht der dreifachen mittleren Dehnung ε_m , Gl. 2.38. Durch den Dehnungsdeviator D' werden die Gestaltänderungen ausgedrückt. Im System der Hauptdehnungen gilt

$$D' = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}\varepsilon_1 - \frac{1}{3}(\varepsilon_2 + \varepsilon_3) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3}\varepsilon_2 - \frac{1}{3}(\varepsilon_3 + \varepsilon_1) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3}\varepsilon_3 - \frac{1}{3}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \end{bmatrix}. \quad (2.39)$$

Alternativ dazu kann der Deformationszustand im System der Hauptdehnungen durch Zylinderkoordinaten dargestellt werden. Die geometrische Entsprechung für die Gleichungen 2.21-2.23 ergibt sich im Raum der Dehnungen formal durch Substitution der Spannungs- durch die Dehnungskomponenten. Es folgen

$$\varepsilon_H = \frac{1}{\sqrt{3}}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) = \frac{\theta}{\sqrt{3}}, \quad (2.40)$$

$$\varepsilon_D = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (2.41)$$

$$\omega_\varepsilon = \arcsin \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_D \sqrt{2}}. \quad (2.42)$$

Die Invariante ε_H stellt ein Maß für die Volumendehnung θ dar. Zwischen den Teiltensoräquivalenten ε_H und ε_D sowie den Oktaederdehnungen besteht folgender Zusammenhang

$$\varepsilon_{\text{okt}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \varepsilon_H, \quad (2.43)$$

$$\gamma_{\text{okt}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_D. \quad (2.44)$$

Die Invariante ω_ε bleibt unverändert. Anstelle der Invarianten ε_H und ε_D lässt sich der Verformungszustand alternativ durch die mittlere Dehnung ε_m nach Gl. 2.38 und die Dehnungsintensität bzw. effektive Dehnung ε_e

$$\varepsilon_e = \frac{1}{\sqrt{2(1+\nu)}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (2.45)$$

sowie den Winkel ω_ε beschreiben.

2.3 Konstitutive Beziehungen

Mit Hilfe der konstitutiven Beziehungen kann die Dehnung als Funktion der Spannung dargestellt werden. Die nachfolgenden Darlegungen beziehen sich auf einige elementare Zusammenhänge, die bei der Auswertung der Versuche herangezogen werden.

Im linear-elastischen Bereich lässt sich der einachsige Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang durch das HOOKE'sche Gesetz:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.46)$$

berechnen, für die Gleitungen gilt

$$\tau = G \cdot \gamma, \quad (2.47)$$

wobei E der Elastizitätsmodul und G der Schub- bzw. Gleitmodul ist. Bei nichtlinearem Materialverhalten wird zwischen Sekantenmodul E_S und Tangentenmodul E_T unterschieden

$$E_S = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}, \quad E_T = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}. \quad (2.48)$$

Im mehrachsigen Fall werden die Steifigkeiten gegenüber Volumenänderungen durch den Kompressionsmodul K und gegenüber Gestaltänderungen durch den Gleitmodul G angegeben. Unter Verwendung der zylindrischen Invarianten (Gl. 2.21, 2.22, 2.40 und 2.41) gelten

$$K = \frac{\sigma_H}{3 \cdot \varepsilon_H}, \quad G = \frac{\sigma_D}{2 \cdot \varepsilon_D}. \quad (2.49)$$

Eine Unterscheidung von Sekanten- und Tangentensteifigkeiten erfolgt analog zum einachsigen Fall.

Das Materialverhalten ist weiterhin durch die Querdehnzahl ν charakterisiert

$$\nu = -\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l}. \quad (2.50)$$

Bei linear-elastischem Materialverhalten stellt ν eine Konstante dar.

Im Allgemeinen ist die Annahme linear-elastischen Materialverhaltens nicht gerechtfertigt, die Beziehungen zwischen den zuvor genannten Größen sind nichtlinear. Konstitutive Beziehungen lassen sich somit nicht theoretisch für die einzelnen Werkstoffe herleiten. Sie werden auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen mit definierten Randbedingungen bestimmt.

2.4 Formänderungsarbeit

Bei der Deformation eines Volumenelementes dV verrichten die von außen angreifenden Kräfte die Arbeit W_a , die als potentielle Energie gespeichert wird. Diese wird als Formänderungsenergiedichte bzw. spezifische Formänderungsenergie U_s bezeichnet. Im allgemeinen dreiachsigen Fall gilt

$$U_s = \int_0^{\varepsilon_x} \sigma_x d\varepsilon_x + \int_0^{\varepsilon_y} \sigma_y d\varepsilon_y + \int_0^{\varepsilon_z} \sigma_z d\varepsilon_z + \int_0^{\gamma_{xy}} \tau_{xy} d\gamma_{xy} + \int_0^{\gamma_{yz}} \tau_{yz} d\gamma_{yz} + \int_0^{\gamma_{zx}} \tau_{zx} d\gamma_{zx}. \quad (2.51)$$

Bei einachsiger Belastung vereinfacht sich Gl. 2.51 zu

$$U_s = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1. \quad (2.52)$$

Unter Verwendung der zylindrischen Invarianten (Gl. 2.21, 2.22, 2.40 und 2.41) können die für Volumenänderungen und Gestaltänderungen aufgewendeten Energieanteile getrennt ausgewiesen werden

$$U_s = U_H + U_D \quad (2.53)$$

mit

$$U_H = \int_0^{\varepsilon_H} \sigma_H d\varepsilon_H, \quad (2.54)$$

$$U_D = \int_0^{\varepsilon_D} \sigma_D d\varepsilon_D. \quad (2.55)$$

Die Formänderungsenergiedichte korrespondiert mit dem Inhalt der Fläche, die durch die Spannungs-Dehnungs-Funktion und die Dehnungsachse begrenzt ist. Der Zusammenhang ist in Abb. 2.4 am Beispiel einer Normalspannungs-Längsdehnungs-Funktion dargestellt, er gilt analog für die sphärischen und deviatorischen Teiltensoräquivalente.

Unter Annahme linear-elastischen Materialverhaltens wird die gesamte gespeicherte Energie bei Entlastung wieder freigegeben. Für reale Werkstoffe trifft dies im Allgemeinen nicht zu. Durch Belastung werden strukturelle Änderungen hervorgerufen, die inelastische Verformungen zur Folge haben. Diese lassen sich nach reversiblen und irreversiblen Anteilen trennen.

Erste umfangreiche Untersuchungen zu dissipativen Mechanismen an Zementstein und Beton wurden von Spooner & Dougill (1975) durchgeführt. Die Zuordnung der jeweils aufgewendeten Energie kann anhand des Spannungs-Dehnungs-Zusammenhanges eines zyklisch beanspruchten Elementes erfolgen, Abb. 2.4. Dabei kennzeichnet W_{el} die elastisch gespeicherte Energie, D_D ist auf reversible inelastische Effekte zurückzuführen und D_S ergibt sich aus bleibenden strukturellen Änderungen. Dieses Prinzip zur Analyse von Strukturreaktionen wurde z. B. an Normalbeton [Bolle 1999], selbstverdichtendem hochfestem Beton [Schwabach 2005] und kunststoffmodifiziertem Beton [Heidolf 2007] angewendet.

Für U_s gilt

$$U_s = W_{el} + D_D + D_S. \quad (2.56)$$

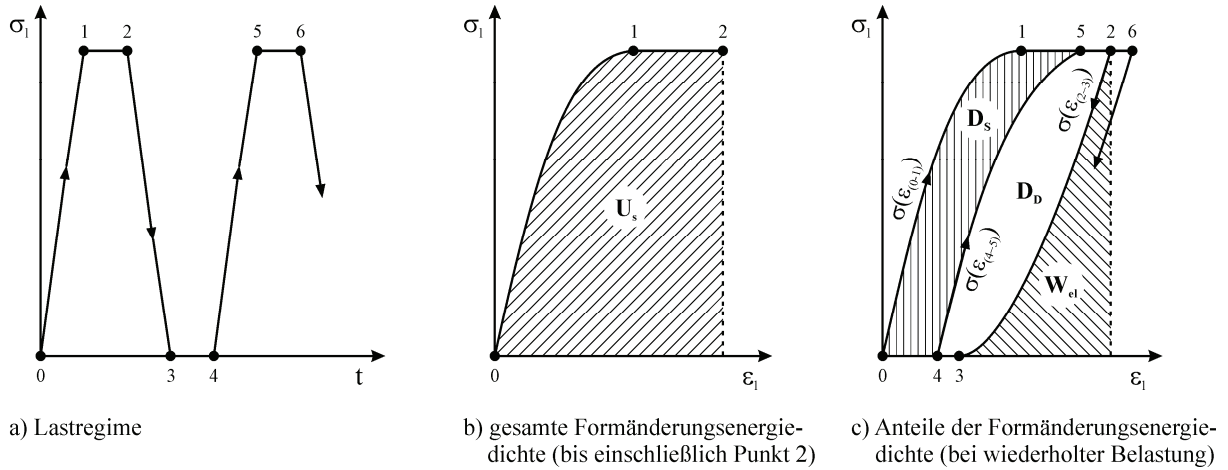


Abb. 2.4: Lastgeschichte und Formänderungsenergie-dichte (allgemeine Zusammenhänge)

Zur Ermittlung der Energieanteile wird die entsprechende Spannungs-Dehnungs-Funktion abschnittsweise integriert

$$D_S = \int_{\varepsilon(0)}^{\varepsilon(1)} \sigma(\varepsilon_{(0-1)}) d\varepsilon + \sigma \cdot (\varepsilon_{(5)} - \varepsilon_{(1)}) - \int_{\varepsilon(4)}^{\varepsilon(5)} \sigma(\varepsilon_{(4-5)}) d\varepsilon, \quad (2.57)$$

$$D_D = \int_{\varepsilon(4)}^{\varepsilon(5)} \sigma(\varepsilon_{(4-5)}) d\varepsilon + \sigma \cdot (\varepsilon_{(2)} - \varepsilon_{(5)}) + \int_{\varepsilon(2)}^{\varepsilon(3)} \sigma(\varepsilon_{(2-3)}) d\varepsilon, \quad (2.58)$$

$$W_{el} = - \int_{\varepsilon(2)}^{\varepsilon(3)} \sigma(\varepsilon_{(2-3)}) d\varepsilon. \quad (2.59)$$

In den Gleichungen 2.51-2.59 sind die Zusammenhänge für einzelne Energiedichten dargelegt. Durch Integration über das Volumen ergibt sich jeweils die in den Körper eingetragene Formänderungsenergie

$$U_V = \int_V U_s dV. \quad (2.60)$$

Kapitel 3

Mechanisches Verhalten von Normalbeton und Porenbeton

In diesem Kapitel wird das Materialverhalten verschiedener Betonarten erläutert, wobei der dampfgehärtete Porenbeton aufgrund der Zielstellung der vorliegenden Arbeit eine besondere Stellung einnimmt. Der dampfgehärtete Porenbeton wird nachfolgend kurz als Porenbeton bezeichnet.

Zur Charakterisierung des vergleichsweise komplexen Materialverhaltens von Beton lässt sich eine Vielzahl von Parametern nennen. Bei Beton kommt Versuchen mit einachsiger Druckbelastung zur Bestimmung der Druckfestigkeit eine besondere praktische Bedeutung zu. Eine Reihe weiterer Materialparameter wird in der Regel aus der Druckfestigkeit abgeleitet.

Zum Materialverhalten von Normalbeton liegen umfassende Untersuchungsergebnisse vor. Anhand von Gegenüberstellungen wird nachfolgend gezeigt, dass Normalbeton und Porenbeton in wesentlichen Eigenschaften grundsätzlich übereinstimmen. Die Übertragbarkeit einzelner Erkenntnisse und Schlussfolgerungen ist somit gewährleistet.

3.1 Herstellung von Normalbeton und Porenbeton

Normalbeton wird aus einem Gemisch von Zement, Gesteinskörnung und Wasser hergestellt, dem weiterhin Zusatzmittel und Zusatzstoffe beigegeben werden können. Einzelheiten zur Herstellung sind in den Normen [z. B. DIN EN 206-1 (2001)] geregelt und in [Grübl et al. 2001] ausführlich dargelegt. Mit der Zugabe des Wassers wird die Zementhydratation ausgelöst. Während der Hydratation durchläuft der Beton ein breites Spektrum an Eigenschaften. Für Bemessungsaufgaben werden in der Regel die im Alter von 28 Tagen ermittelten Parameter herangezogen. Die weitere Strukturbildung wird als *Nacherhärtung* bezeichnet. Durch den Mischungsentwurf und den Herstellungsprozess können die Eigenschaften des Betons an vorgegebene Anforderungen angepasst werden [Grübl et al. 2001].

Für die Herstellung von *Porenbeton* werden Bindemittel, wie Zement und/oder Kalk, feines kieselsäurehaltiges Material, porenbildendes Material, Wasser und gegebenenfalls Zusatzmittel verwendet. Eine normative Spezifikation der verwendbaren Materialien wird in [DIN EN 12602 (2006)] vorgenommen. Nach dem Mischvorgang wird die Suspension in Formen gegossen, in denen sie unter Porenbildung auftreibt und zu standfesten Blöcken erstarrt. Der Durchmesser der Makroporen hängt von der

Herstellung ab und beträgt im Allgemeinen nicht mehr als 2 mm [Wittmann 1983]. In dieser Phase der Strukturbildung erfolgt der Zuschchnitt des Kuchens in Elemente. Abschließend wird das Material im Autoklav in gespanntem Dampf für mehrere Stunden gehärtet. Der Einfluss einzelner Komponenten und des Herstellungsprozesses auf die Eigenschaften des Porenbetons werden in [Gundlach 1973; Narayanan & Ramamurthy 2000] diskutiert.

Nach der Herstellung kann die Strukturbildung des Porenbetons als weitgehend abgeschlossen betrachtet werden, eine Nacherhärtung tritt nicht ein [Narayanan & Ramamurthy 1999, Grübl et al. 2001]. Für die mechanischen Eigenschaften von Porenbeton ist der nach der Herstellung im Material enthaltene Feuchtegehalt von besonderer Bedeutung [Wittmann 1983], siehe Kapitel 3.2.1.

3.2 Materialwiderstand

Aus baupraktischen Aspekten wird zwischen kurzzeitig und langfristig wirkender Beanspruchung unterschieden, wobei die Abgrenzung normativ geregelt wird. Aus theoretischer Sicht ist diese Trennung nicht erforderlich, wenn Strukturreaktionen grundsätzlich in Zusammenhang mit dem entsprechenden Beanspruchungs-Zeit-Regime gesehen werden.

Der an einem Probekörper im Versuch ermittelte Maximalwert der makroskopischen Spannung, der allgemein als *Festigkeit* verstanden wird, spiegelt die Gesamtheit der zugrunde liegenden Versuchsbedingungen wider. Die Festigkeit bei monoton steigender Beanspruchung ist nicht nur von der Beanspruchungsgeschwindigkeit, sondern auch von weiteren Randbedingungen abhängig. Dementsprechend wird der Begriff Festigkeit in der vorliegenden Arbeit nicht als Stoffkennwert verstanden, sondern allgemein für den makroskopischen Bruchwiderstand unter entsprechenden Randbedingungen gebraucht.

Im Folgenden wird der Einfluss einzelner Randbedingungen auf die *einachsige Druckfestigkeit* eingehend diskutiert. Prinzipiell ist davon auszugehen, dass die beschriebenen Phänomene auch bei anderen Beanspruchungskonstellationen, d. h. bei Zugbeanspruchung und mehrachsiger Beanspruchung zu beobachten sind.

3.2.1 Monoton ansteigende Beanspruchung

Die versuchstechnisch ermittelte *Druckfestigkeit* des Betons ist umso größer, je zügiger die Beanspruchung in den Probekörper eingetragen wird, Abb. 3.1a. Soweit die Nacherhärtung vernachlässigt werden kann, wirkt der Minimalwert des Bruchwiderstandes bei unendlich kleiner *Beanspruchungsgeschwindigkeit*. In Abb. 3.1b sind die Verhältnisse für Porenbeton angegeben. Danach hat die Beanspruchungsgeschwindigkeit auf beide Baustoffe einen vergleichbaren Einfluss.

Die Ermittlung der Kurzzeitdruckfestigkeit von Normalbeton und Porenbeton erfolgt normgemäß im kraftgeregelten Versuch. Die Belastungsgeschwindigkeit ist materialbezogen normativ festgelegt, sie beträgt für Normalbeton 0,2...1 N/mm²/s [DIN EN 12390-3 (2002)] und für Porenbeton 0,1 N/mm²/s [EN 679 (2005)].

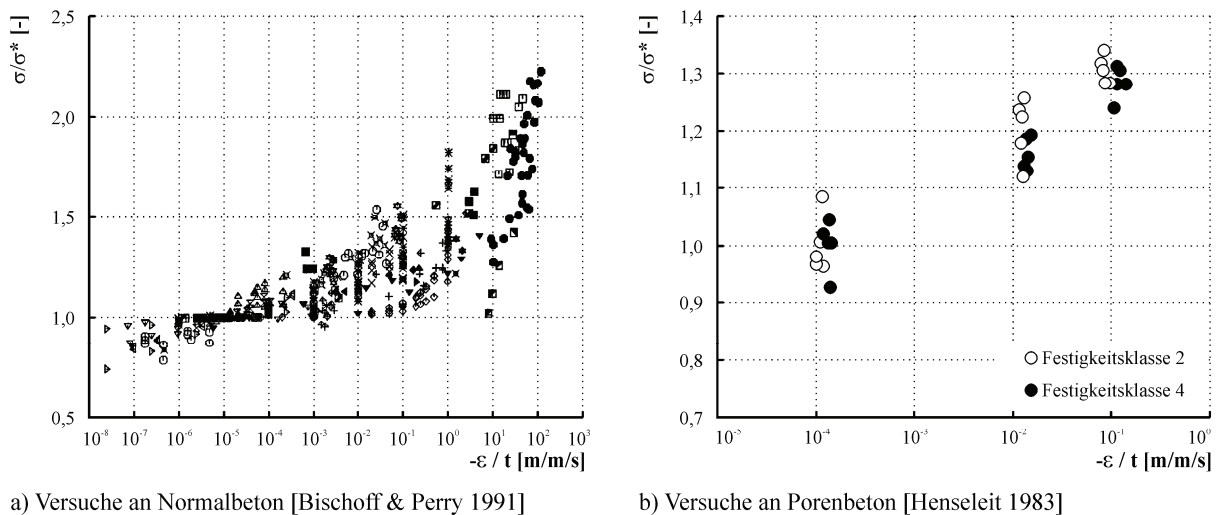


Abb. 3.1: Zusammenhang zwischen Beanspruchungsgeschwindigkeit und Materialwiderstand von Normalbeton und Porenbeton (σ^* liegen für Normalbeton und Porenbeton Beanspruchungsgeschwindigkeiten von 10^{-5} bzw. 10^{-4} m/m/s zugrunde)

Das Versagen von Normalbeton wird durch Rissbildung eingeleitet. Die Ursache der Rissbildung bzw. Strukturänderungen sind entsprechend der Beanspruchungsgeschwindigkeit unterschiedlich zu werten. Während im Bereich moderater Beanspruchungsgeschwindigkeiten das Kriechen und die damit einhergehenden Rissbildungs- und Rissausbreitungsprozesse als maßgeblich angesehen werden [Rüsch et al. 1968, Diaz & Hilsdorf 1971], wird das Widerstandsvermögen bei hohen Spannungs- bzw. Dehnraten von der Wirkung der Massenträgheit geprägt [Curbach 1987, Eibl & Schmidt-Hurtienne 1999, Plotzitz 2002]. Ein Einfluss des Wasserhaushaltes des Normalbetons auf das Kriechverhalten ist vorhanden [Wesche & Krause 1972, Ross et al. 1996]. Bei Versuchen mit Druckbelastung leistet der in den Poren entstehende Porenwasserdruck einen zusätzlichen Beitrag zur Lastabtragung [Dhir & Sangha 1972].

Neben der Beanspruchungsgeschwindigkeit hat die Gestalt des Probekörpers, insbesondere die *Probekörperschlankheit* Einfluss auf den makroskopischen Materialwiderstand. Aus dem Reibungswiderstand zwischen den Probekörperendflächen und den Druckplatten der Prüfmaschine resultiert eine Querdehnungsbehinderung, die einen mehrachsigen Spannungszustand zur Folge hat. Der Einfluss der Querdehnungsbehinderung auf den Spannungszustand klingt mit zunehmendem Abstand von den Druckflächen ab. Daraus resultiert ein für schlanke Probekörper geringerer Bruchwiderstand. Bei gedrungenen Probekörpern lässt sich die Querdehnungsbehinderung minimieren, indem statt starrer Druckplatten schlauffe Druckplatten (Bürsten) verwendet werden.

Entsprechend theoretischen Untersuchungen [Schleeh 1975a, b, Taheri & Hazivar 1986] kann für Probekörper mit Schlankheiten, die nicht kleiner als $l:d = 2:1$ sind, in Bezug auf die Längsrichtung in Probekörpermitte näherungsweise von einem einachsigen Spannungszustand ausgegangen werden, der Einfluss der Querdehnungsbehinderung ist weitgehend abgeklungen. Dies wird durch experimentelle Untersuchungen an Normalbeton [Schickert 1981] bestätigt, Abb. 3.2a. Für Leichtbeton [Siebel & Wischers 1989a, b] und für Porenbeton [Sell 1970, Briesemann 1975, Daschner & Zilch 2001, Schubert & Schmidt 2002] ist der Schlankheitseinfluss weniger bedeutend, Abb. 3.2b. Den Abbildungen

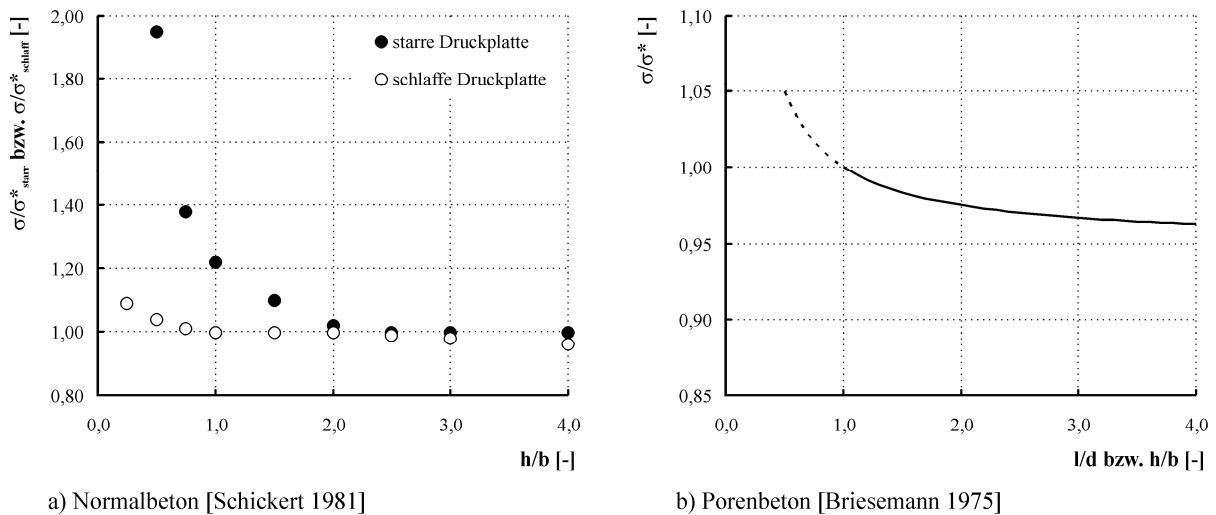


Abb. 3.2: Zusammenhang zwischen Probekörperschlankheit und Materialwiderstand bei Normalbeton und Porenbeton

liegen die Referenzspannungen σ^*_{starr} , $\sigma^*_{schlauff}$ und σ^* , zugrunde, die den Schlankheiten von 1,0, 2,5 bzw. 1,0 zugeordnet sind.

Bei Porenbeton sind die *Treibhöhe* und die Beanspruchungsrichtung in Bezug zur *Treibrichtung* der Probekörper für den Materialwiderstand von Bedeutung. Die Druckfestigkeit beträgt in Treibrichtung ca. 90 % des Wertes, der ermittelt wird, wenn die äußere Druckbeanspruchung senkrecht zur Treibrichtung erfolgt [Aroni et al. 1993, John & Schober 1994]. Bedingt durch den Herstellungsprozess ist die Dichte und somit die Druckfestigkeit im oberen Teil der Form kleiner als im unteren Teil, Abb. 3.3a. Nach EN 679 (2005) sind zur Untersuchung der Kurzzeitdruckfestigkeit von Porenbeton Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm zu verwenden, wobei in jeder Prüfserie je ein Probekörper aus dem oberen, dem mittleren und dem unteren Drittel der Treibhöhe enthalten sein soll. Die Belastung soll dabei senkrecht zur Treibrichtung eingeleitet werden.

Zwischen der Druckfestigkeit des Porenbetons und dem im Material enthaltenen *Feuchtegehalt* besteht ein unmittelbarer Zusammenhang, die Druckfestigkeit nimmt bei steigendem Feuchtegehalt ab [Briesemann 1976, Wittmann 1983, Schubert & Schmidt 1990, Aroni et al. 1993], Abb. 3.3b.

Untersuchungen von Sell (1970) lassen außerdem eine Abhängigkeit der Ausgleichsfeuchte von der Probekörpergestalt erkennen. Danach enthalten Würfel im Ausgleichszustand weniger Feuchtigkeit als Zylinder. Dies wird von Sell auf die Probekörperentnahme zurückgeführt: Zylinder werden im Allgemeinen gebohrt und Würfel bzw. Prismen gesägt. In EN 679 (2005) ist festgelegt, dass die Druckfestigkeitsprüfung von Porenbeton bei einem mittleren Feuchtegehalt von 6 ± 2 % Massenanteil (M.-%) erfolgen soll.

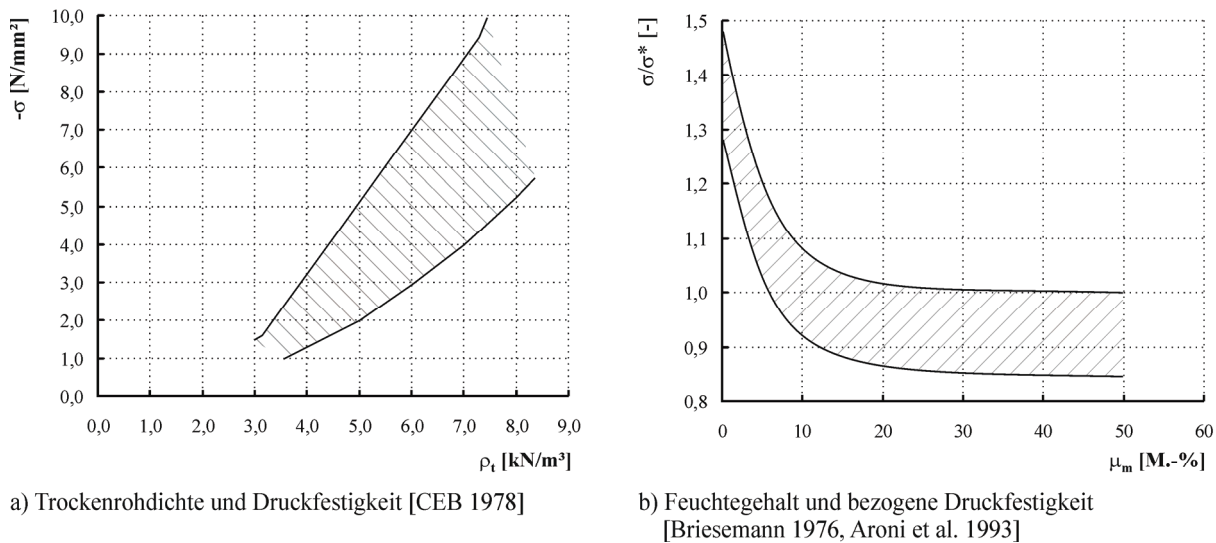


Abb. 3.3: Zusammenhang zwischen Rohdichte bzw. Feuchtegehalt und Materialwiderstand bei Porenbeton (σ^* : Druckfestigkeit bei $\mu_m = 10$ M.-%)

3.2.2 Ruhende Belastung

Ruhende Dauerbeanspruchungen können als Sonderfall monoton steigender Beanspruchung angesehen werden: Erreicht die Beanspruchungsgeschwindigkeit den Wert null, erfolgt der Übergang zur ruhenden Beanspruchung. Bei experimentellen Untersuchungen zum Materialwiderstand gegenüber ruhender Belastung wird die Beanspruchung bis zum Erreichen des vorgesehenen Beanspruchungsniveaus meist zügig aufgebracht und anschließend konstant gehalten. Die vom Material bis zum Eintreten des Versagens ertragene Standzeit richtet sich nach der Beanspruchungsintensität. Ausgehend vom Minimalwert des Bruchwiderstandes, der *Dauerstandfestigkeit*, ist die Standzeit umso kürzer, je höher die eingetragene Beanspruchung über diesem Wert liegt. Unterhalb der Dauerstandgrenze haben die Beanspruchungsdauer und die Beanspruchungsgeschwindigkeit keinen Einfluss auf den Materialwiderstand.

Experimentelle Untersuchungen zur Dauerstandfestigkeit sind zeitaufwendig. Für den Nachweis der Dauerstandfestigkeit sind praktisch zwei Versuchsarten relevant:

- der *Kriechversuch* mit konstant gehaltener Last und
- der *Relaxationsversuch* mit konstant gehaltener Verformung.

Die folgenden Darlegungen beziehen sich auf Kriechversuche mit einachsiger Druckbelastung.

Das Verhältnis von Dauerstandfestigkeit zu definierter Kurzzeitfestigkeit wird als Beanspruchungsintensität angegeben, es variiert je nach Materialzusammensetzung und Beanspruchungsart, Tab. 3.1. Im Falle exzentrisch eingetragener Beanspruchungen hat neben der Größe der Exzentrizität [Rasch 1967, Shkoukani & Walraven 1991, Iravani & MacGregor 1998] auch die Querschnittsform Einfluss auf die Dauerstandfestigkeit [Rüsch & Stöckl 1969]. Der Einfluss mehrachsiger Beanspruchungen auf den

Tab. 3.1: Dauerstandfestigkeit verschiedener Betonarten bei Beanspruchung im Betonalter von 28 Tagen

Betonart	Beanspruchung	$-\sigma / f_{cm};$ σ / f_{ctm}	Quellen
Leichtbeton		0,70...0,80	Zelger 1970, Wittmann & Zaitsev 1974, Smadi et al. 1985
Normalbeton	Druck , einachsig, zentrisch	0,80	Rüsch 1960, Glücklich 1965, Wittmann & Zaitsev 1974, Smadi et al. 1985, Nechvatal 1996
hochfester Beton		0,80...0,85	Smadi et al. 1985, Han & Walraven 1993, Iravani & MacGregor 1998
Normalbeton	Zug , einachsig, zentrisch	0,60...0,75	Al-Kubaisy & Young 1975, Shkoukani & Walraven 1991, Kordina et al. 2000
hochfester Beton		0,75	Han & Walraven 1993, Rinder 2003

Verhältniswert der Dauerstandfestigkeit hängt von der Beanspruchungskonstellation ab [Linse & Stegbauer 1976a].

Die Intensität der Rissbildung hängt mit dem Auslastungsgrad zusammen. Während die Rissbildung und Rissausbreitung bei niedrigen Auslastungsgraden zeitabhängig abklingen, schreiten sie ab Erreichen der Dauerstandgrenze instabil voran [Glücklich 1965, Smadi & Slate 1989]. Dieser beanspruchungsbedingten Strukturentfestigung wirkt die bei Normalbeton fortschreitende Hydratation entgegen. Wird eine gewisse Beanspruchungsdauer, *kritische Standzeit*, ertragen, ist nicht mehr mit einem Versagen der Probekörper zu rechnen, wenn die beanspruchungsbedingte Entfestigung durch die Nacherhärtung „überkompensiert“ wird. Die kritische Standzeit und der zugehörige Spannungswert, *kritische Spannung*, richten sich nach dem Betonalter bei Belastungsbeginn und der materialspezifischen Hydratationskinetik. Versuchsergebnisse von Rüsch et al. (1968) sind in Abb. 3.4a dargestellt.

Ein Berechnungsansatz, mit dem die gegenläufigen Auswirkungen von Entfestigung und Nacherhärtung getrennt erfasst werden, ist in Model Code 90 (1991) enthalten. Ausgegangen wird von der 28-Tage-Festigkeit $f_{cm,28}$, die mit einem Koeffizienten $\beta_{cc}(t)$ zur Berücksichtigung der Nacherhärtung und einem weiteren Koeffizienten $\beta_{c,sus}(t, t_0)$, der einen Zusammenhang zwischen Beanspruchungsintensität und ertragener Standzeit unter Ausschluss der Nacherhärtung herstellt, modifiziert wird. Die Festigkeit zum Zeitpunkt t ergibt sich aus

$$f_{cm,sus}(t, t_0) = f_{cm,28} \cdot \beta_{cc}(t) \cdot \beta_{c,sus}(t, t_0) \quad (3.1)$$

Für $\beta_{c,sus}(t, t_0)$ gilt

$$\beta_{c,sus}(t, t_0) = 0,96 - 0,12 \left\{ \ln \left[72 \left(\frac{t - t_0}{t_1} \right) \right] \right\}^{1/4} \quad (3.2)$$

mit $t - t_0$ = Standzeit in d,
 t_1 = 1 d,

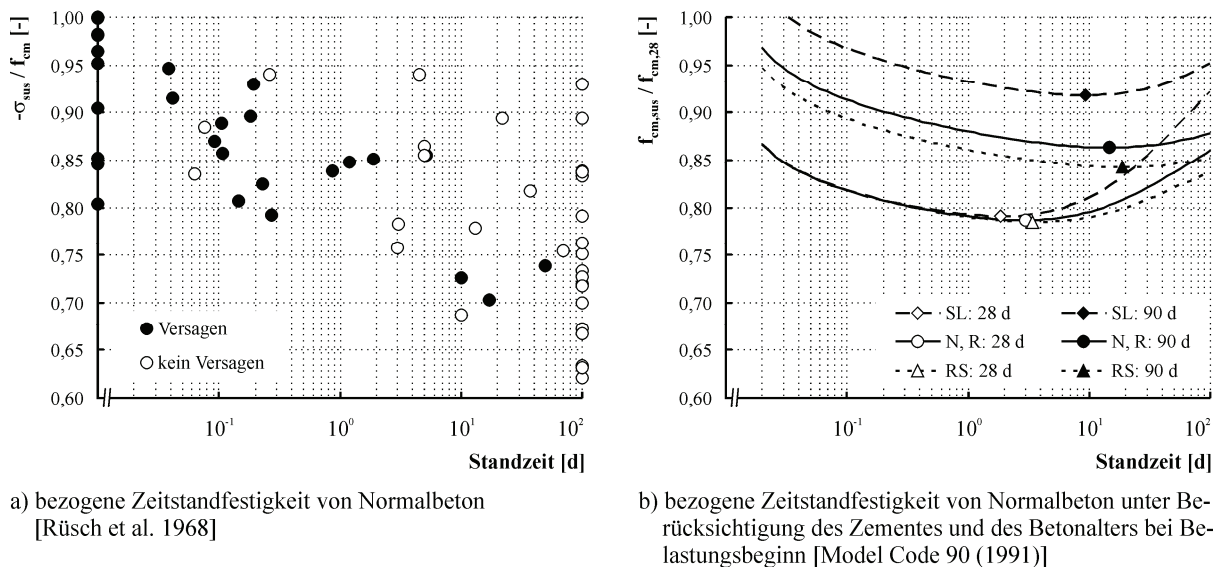


Abb. 3.4: Verhalten von Normalbeton unter ruhender Dauerbeanspruchung

wobei die Mindeststandzeit 20 min, also etwa 0,015 Tage beträgt.

In Abb. 3.4b sind beispielhaft Funktionen von $f_{cm,sus}$ für Beton C 50/60 unter Verwendung verschiedener Zemente dargestellt. Die Belastung erfolgt im Alter von 28 bzw. 90 Tagen.

Der Einfluss der zuvor genannten Parameter auf die kritische Spannung und die kritische Standzeit ist erkennbar. Anzumerken ist, dass die angegebenen Funktionen lediglich bis zum Erreichen der Minima eindeutig sind. Der sich anschließende Festigkeitszuwachs ergibt sich formal aus der Überlagerung der Funktionen und besitzt keine physikalische Bedeutung.

Ergebnisse experimenteller Untersuchungen lassen darauf schließen, dass moderate Dauerbeanspruchungen, wenngleich diese zu begrenzter Rissbildung im Gefüge führen, eine Erhöhung des makroskopischen Materialwiderstandes für nachfolgende Beanspruchungen bewirken können [Freudenthal & Roll 1958, Awad & Hilsdorf 1974, Wittmann & Zaitsev 1974, Probst & Stöckl 1978, Nechvatal 1996, Rinder 2003]. Wittmann & Zaitsev (1974) gehen davon aus, dass dieser Festigkeitszuwachs ungeachtet der Hydratation auf einen kriechebedingten Abbau von Spannungsspitzen an den Risswurzeln zurückzuführen ist und damit bei weniger kriechefähigen Materialien, wie z. B. Leichtbeton, kaum festgestellt werden kann.

Diese Festigkeitserhöhung wurde ebenfalls bei experimentellen Untersuchungen zur Zugfestigkeit nach vorangegangener Standbelastung unter Zugspannungen an Normalbeton und hochfestem Beton beobachtet. Nach Blaschke (1993) und Rinder (2003) wird durch die vorbeanspruchungsbedingte Rissbildung die Feuchtigkeitsdiffusion im Betongefüge erhöht und die Hydratation angeregt, was eine Erhöhung des Materialwiderstandes zur Folge hat.

Zur Dauerstandfestigkeit von Porenbeton sind vergleichsweise wenige Untersuchungen bekannt. Sie beschränken sich auf Versuche unter einachsiger zentrischer Druckbelastung. Die Ergebnisse von Sell & Zelger (1969) lassen erkennen, dass durch hohe Dauerlasten wie bei Normalbeton eine Materialent-

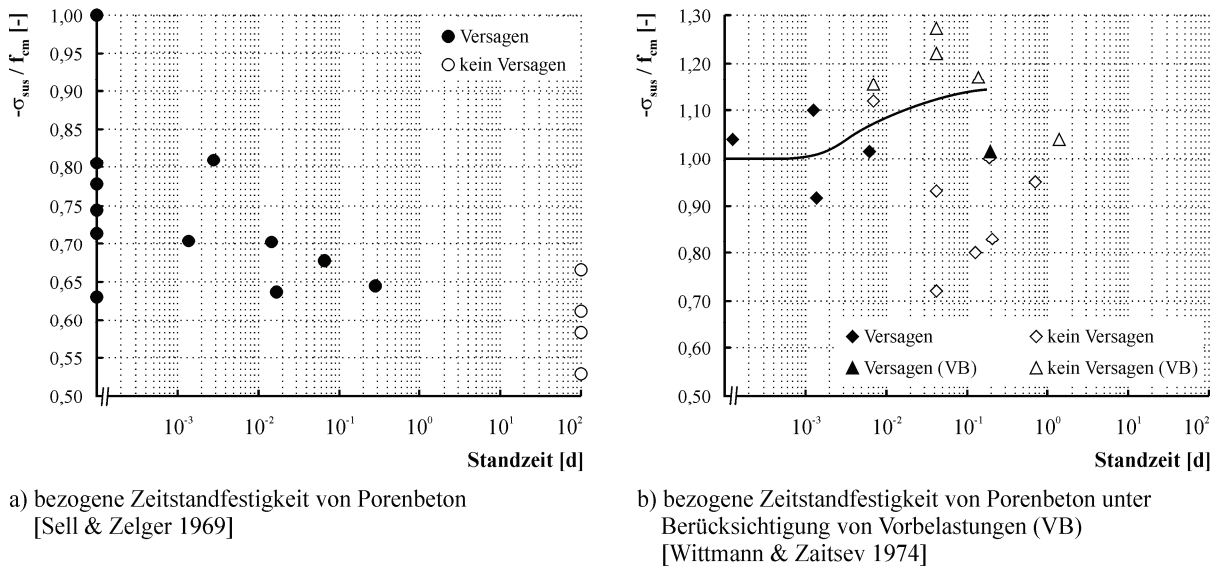


Abb. 3.5: Verhalten von Porenbeton unter ruhender Dauerbeanspruchung

festigung hervorgerufen wird, Abb. 3.5a. Der entfestigende Einfluss hoher Dauerlasten wurde später durch experimentelle Untersuchungen bestätigt [Marzahn 2000].

Demgegenüber stellten Wittmann & Zaitsev (1974) einen Zuwachs des makroskopischen Materialwiderstandes von Porenbeton unter hohen Dauerlasten fest. Sofern das Probekörperversagen bei den Dauerstandversuchen nicht bei Erstbelastung eingetreten ist, wurde der entsprechende Probekörper entlastet und anschließend einer höheren Dauerlast ausgesetzt. Bei vorbelasteten Probekörpern trat das Versagen ausschließlich bei Dauerlasten ein, die höher als die mittlere Kurzzeitfestigkeit des Materials waren (Abb. 3.5b).

Auf der Grundlage der zuvor genannten Versuchsergebnisse ist eine einheitliche Bewertung der Dauerstandfestigkeit von Porenbeton nicht möglich. Dies ist insbesondere auf die geringe Probekörperanzahl und die vergleichsweise großen Streuungen in den Ergebniswerten zurückzuführen. Die Bewertung wird zusätzlich dadurch erschwert, dass bei den Versuchsdurchführungen unterschiedliche Randbedingungen vorlagen. Die Belastung erfolgte in [Sell & Zelger 1969] senkrecht, in [Wittmann & Zaitsev 1974] parallel zur Treibrichtung des Porenbetons. Weitere Unsicherheiten ergeben sich aus dem Umstand, dass in [Sell & Zelger 1969] für die Versuche mit Standbelastung und für die Versuche zur Bestimmung der Kurzzeitfestigkeit Probekörper unterschiedlicher Geometrie verwendet worden sind.

Für eine quantitative Beurteilung der Dauerstandfestigkeit von Porenbeton sind weitere experimentelle Untersuchungen notwendig. Um die Vergleichbarkeit zu sichern, sind einheitliche Randbedingungen für die Versuchsdurchführung zu definieren und einzuhalten. Dies betrifft insbesondere Forderungen zur Probekörpergeometrie, zur Treibhöhe, zur Treibrichtung und zum Feuchtegehalt.

3.2.3 Zyklisch eingetragene Belastung

Das Maß an strukturellen Änderungen, durch die das Versagen eingeleitet wird, hängt wesentlich von der Beanspruchungsintensität ab. Bei zyklisch eingetragener Beanspruchung tritt zusätzlich das Phänomen der *Ermüdung* in Erscheinung.

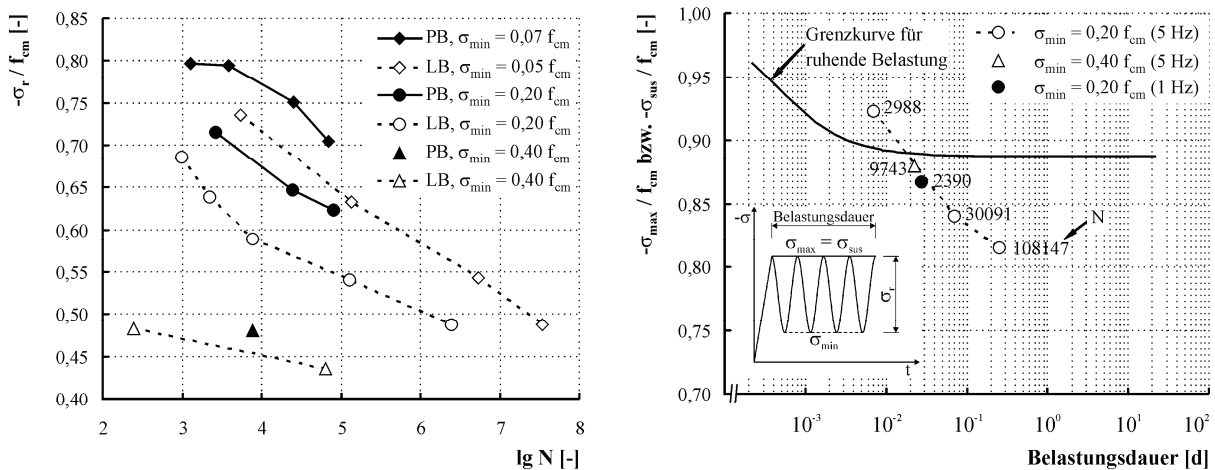
Häufig wiederkehrende Beanspruchungen führen aufgrund fortschreitender Strukturänderungen im Vergleich zu ruhenden Beanspruchungen bereits bei geringeren Beanspruchungsintensitäten zum Versagen. Die Zahl der ertragenen Lastwechsel hängt neben der Belastungsfrequenz wesentlich von der Oberspannung σ_{max} , der Unterspannung σ_{min} und damit der Schwingbreite σ_r ab.

Experimentelle Untersuchungen mit Druckschwellbelastung wurden z. B. von Klausen (1978) an Normalbeton und von Weigler & Freitag (1975) an Leichtbeton durchgeführt. Mit eigenen Versuchen [Rau & Tartsch 2005] konnte gezeigt werden, dass das Ermüdungsverhalten von Porenbeton grundsätzlich mit dem von Normal- und Leichtbeton vergleichbar ist, die Struktur des Porenbetons aber bei identischen Beanspruchungsintensitäten unempfindlicher gegenüber Schwellbelastungen reagiert, Abb. 3.6a. Die Streuungen in Bezug auf die Bruchlastspielzahlen fallen zudem bei Porenbeton wesentlich kleiner aus als bei Leichtbeton und Normalbeton [Rau & Tartsch 2005].

Die Belastungsfrequenz hat einen signifikanten Einfluss auf die erreichte Lastspielzahl, bei höheren Frequenzen werden bei sonst gleichen Bedingungen mehr Lastwechsel ertragen. Wie bei monoton gesteigerter Beanspruchung kann dies unter anderem auf die Beanspruchungsgeschwindigkeit zurückgeführt werden. Bei einmaliger Belastung sind Ermüdungseffekte, soweit man davon ausgeht, dass diese Effekte bereits bei der ersten, unvollständigen Schwingung auftreten, von untergeordneter Bedeutung, treten aber bei höheren Schwingspielzahlen bzw. Schwingdauern ausgeprägt in Erscheinung [Reinhardt et al. 1978].

Eine Einschätzung zur Bedeutung der Ermüdungseffekte für Strukturänderungen im niederzyklischen Bereich lässt sich anhand der eigenen experimentellen Untersuchungen für Porenbeton vornehmen. In Abb. 3.6b sind die Schwingdauern für die einzelnen Serien und die Grenzkurve für die Standzeiten bei ruhenden Belastungen entsprechender Intensität gegenübergestellt. Daraus geht hervor, dass das Versagen oberhalb der Dauerstandgrenze mit ruhender Belastung zügiger herbeigeführt wird als mit schwingender Belastung. Ein weiteres Indiz dafür, dass im hohen Lastbereich die Einflüsse aus Lastintensität und Haltezeit für die Strukturänderungen gegenüber den Ermüdungsphänomenen dominierend sind, lässt sich aus der Feststellung ableiten, dass für Beanspruchungen im Bereich der Dauerstandfestigkeit sowohl die Belastungsfrequenz als auch die Schwingbreite an Bedeutung verlieren, Abb. 3.6b.

Bei den in Kapitel 5 näher beschriebenen Versuchen mit wiederkehrender Druckbelastung war die bis zum Versagen erreichte Gesamtzyklenzahl entsprechend den gewählten Belastungsgraden für die einzelnen Probekörper unterschiedlich, der Höchstwert war mit 58 Zyklen vergleichsweise gering. Deshalb wird Ermüdungseffekten nachfolgend eine untergeordnete Bedeutung beigemessen.



a) ertragene Lastspielzahl N in Abhängigkeit von der bezogenen Schwingbreite für Leichtbeton (LB) [Weigler & Freitag 1975] und Porenbeton (PB) [Raue & Tartsch 2005]

b) ertragene Schwingdauer bei 5 bzw. 1 Hz und Zeitstandfestigkeit von Porenbeton [Raue & Tartsch 2005]

Abb. 3.6: Verhalten von Leichtbeton und Porenbeton unter häufig wiederkehrender Druckbelastung

3.3 Verformungen und Steifigkeit

Die Verformungen des Betons werden im Allgemeinen nach deren Ursachen in Schwind- und Temperaturdehnungen, sowie in Dehnungen unterschieden, die auf mechanische Beanspruchungen zurückzuführen sind. Im Rahmen dieser Arbeit kommt den Verformungen, die durch mechanische Beanspruchungen hervorgerufen werden, besondere Bedeutung zu.

Zur wirklichkeitsnahen Beschreibung des Materialverhaltens sind die elementaren Zusammenhänge zwischen Kräften und Verformungen (Kapitel 2.3) nicht mehr hinreichend. Hier ist zusätzlich die Zeit einzubeziehen. In Bezug auf den Zusammenhang zwischen Kräften und Verformungen treten die Phänomene Kriechen bzw. Relaxation in Erscheinung. Maßgeblich beeinflusst wird dieser Zusammenhang durch die Effekte der Alterung des Betons. Diese Zeitabhängigkeit des Materialverhaltens äußert sich in einer Abnahme oder Erhöhung des Materialwiderstandes und der Steifigkeit.

Im Zusammenhang mit Beanspruchungen bewirkt die Nacherhärtung eine Abnahme der Kriechgeschwindigkeit [Freudenthal 1955] sowie irreversible Verformungen [Grübl et al. 2001]. Im Unterschied zu Normalbeton ist bei Porenbeton kein Festigkeitszuwachs infolge Nacherhärtung festzustellen. Sofern keine anderen chemischen Umbildungen auftreten, kann der Einfluss der Alterung auf das Materialverhalten deshalb vernachlässigt werden.

Grundsätzlich lässt sich die Gesamtdeformation eines Körpers als Überlagerung von Volumenänderungen und Gestaltänderungen ansehen [Freudenthal 1955]. Die Volumenänderungen werden im Allgemeinen als sofort reversibel, d. h. als elastisch aufgefasst. Zusätzlich zum elastischen Verformungsanteil treten bei Gestaltänderungen inelastische Anteile auf, die nach verzögert reversibel und irreversibel unterschieden werden.

Die Mehrheit der bisherigen Untersuchungen zum zeitabhängigen Formänderungsverhalten von Beton sowie die Festlegungen in den Normen [z. B. DIN 1045-1 (2001), Model Code 90 (1991)] beziehen sich auf die bei einachsigen Druckbeanspruchungen in Lastrichtung auftretenden *Längsverformungen*. Die zeitabhängige Entwicklung der Querverformungen sowie der Volumenänderungen und Gestaltänderungen wurde selten explizit untersucht.

3.3.1 Temperatur- und Schwindverformungen

Grundsätzlich wird bei *Temperaturerhöhung* eine Volumenzunahme und bei Temperaturverringerung eine Volumenabnahme festgestellt. Die dabei ablaufenden Prozesse sind komplex. Es ist davon auszugehen, dass sich Temperaturänderungen auf den Feuchtegehalt, die chemische Reaktion und die mechanischen Eigenschaften auswirken [Grübl et al. 2001, Betonkalender 2002]. Die Temperaturdehnzahlen für Normalbeton und Porenbeton liegen etwa in der Größenordnung 10^{-5} K^{-1} . Im Allgemeinen tritt infolge Temperaturänderung bei massiven Bauteilen ein Temperatur- und ein Dehnungsgradient im Element auf, der sich bei konstant gehaltenen Umgebungsbedingungen zeitabhängig abbaut. Aufgrund des heterogenen Aufbaus entstehen im Gefüge zusätzlich Zwangsspannungen.

Bei Porenbeton wirken während der Herstellung besondere Temperaturbeanspruchungen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass infolge der ungleichförmigen Abkühlung nach der Autoklavierung, die bei ca. 190 °C stattfindet, im Materialgefüge Spannungen entstanden sind. Inwieweit diese Beanspruchungen bereits zu Strukturänderungen führen können und somit das Last-Verformungs-Verhalten des „fertigen“ Porenbetons beeinflussen, ist nicht bekannt.

Das *Schwinden* von Normalbeton wird wesentlich auf chemische Reaktionen (chemisches Schwinden) und die Wasserabgabe an die Umgebung (Trocknungsschwinden) zurückgeführt. Diese Prozesse sind mit einer Volumenverringerung verbunden. Die Wasseraufnahme führt zu einer Volumenzunahme, dem Quellen. Einflüsse und Ursachen für das Schwinden von Normalbeton sind z. B. in [Grübl et al. 2001, Betonkalender 2002] und für das Schwinden von Porenbeton in [Schubert 1983] ausführlich dargelegt.

Unter konstanten Randbedingungen lässt sich das Schwinden grundsätzlich als zeitabhängig abklingender Prozess mit affin verlaufender Volumenabnahme auffassen. Aufgrund der Feuchtigkeitsabgabe über die Oberfläche sind die Schwindverformungen über den Querschnitt ungleich verteilt [Roelfstra & Wittmann 1983, Hampe et al. 1993]. Daraus resultiert ein Eigenspannungszustand mit Zugspannungen an der Außenseite und Druckspannungen im Inneren des Querschnittes, was zu Oberflächenrissen führen kann. Das Maß der Rissbildung richtet sich unter anderem nach der Geschwindigkeit der Feuchtigkeitsabgabe. Abgesehen von diesem Eigenspannungszustand können aufgrund der Heterogenität des Betons im Gefüge lokale Spannungsspitzen, Gefügespannungen, auftreten, die zu weiteren Rissen führen. Diese sind insbesondere in der Kontaktzone von Matrix und Gesteinskorn zu erwarten [Betonkalender 2002].

Die Größenordnung der bei Normalbeton auftretenden Schwinddehnungen beträgt ca. 0,1...1,0 mm/m. Ein Vorhersageverfahren für Normalbeton ist in [Zilch et al. 2003, Model Code 90 (1991)] angegeben. Diesem liegt ein Endwert für die Schwindverformungen zugrunde, der nach 70 Jahren zu erwarten ist. Für Porenbeton wird nach [DIN 4223-1 (2003)] ein Schwindmaß von $\varepsilon_{s0} = 0,25 \text{ mm/m}$ bei einer masseebezogenen Feuchte von 6...30 % angenommen. Zusätzlich zum Trocknungsschwinden kann bei

Porenbeton, der einer angereicherten CO_2 -Atmosphäre ausgesetzt ist, in erhöhtem Maße Karbonatisierungsschwinden auftreten [Grübl et al. 2001].

Unter normalen Verhältnissen dominiert bei Porenbeton das Trocknungsschwinden. Unmittelbar nach der Herstellung liegt ein vergleichsweise hoher Feuchtegehalt von etwa 25...35 M.-% vor. Ein ausgeglichener Zustand wird unter praktischen Verhältnissen bei 3,5...5 M.-% nach 1...3 Jahren erreicht [Aroni et al. 1993]. Ausgehend von der Ausgleichsfeuchte führen zyklisch veränderte klimatische Verhältnisse zu einer Zunahme bzw. Abnahme des Feuchtegehaltes, was unmittelbar als ein Wechsel von Schwinden und Quellen wahrnehmbar ist. Funktionelle Ansätze zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufes der Schwindverformungen sowie Einflussfaktoren auf das Schwinden von Porenbeton werden in [Schubert 1983, Aroni et al. 1993] diskutiert.

Die eigenen experimentellen Untersuchungen erfolgten unter konstanten klimatischen Verhältnissen bei ausgeglichenem Feuchtegehalt. Der Einfluss variabler Temperaturdehnungen und Schwindverformungen auf das Tragverhalten wird nicht analysiert.

3.3.2 Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge und abgeleitete Größen

3.3.2.1 Monoton ansteigende Beanspruchung

Zwischen den Größen Last und Verformung besteht bei Normalbeton ein nichtlinearer Zusammenhang. Mit steigender Beanspruchungsintensität nehmen die Längs- und Querverformungen des Betons überproportional zu, Abb. 3.7a. Zudem ändert sich deren Verhältnis. Bei niedrigen Beanspruchungen ist die Querdehnzahl ν näherungsweise konstant und beträgt etwa 0,2, d. h. Längs- und Querverformungen entwickeln sich nahezu proportional zueinander, Abb. 3.7b. Für höhere Beanspruchungsintensitäten ist diese Annahme nicht mehr zutreffend, die Querverformungen dominieren das Last-Verformungs-Verhalten und die Querdehnzahl steigt an. Dieses Verhalten ist für Zementstein [Wittmann & Zaitsev 1974, Linse & Stegbauer 1976b], für verschiedene Betonarten [Kupfer 1973, Wittmann & Zaitsev 1974, Linse & Stegbauer 1976b, Iravani & MacGregor 1998, Basche et al. 2003] und auch für Porenbeton [Sell 1970, Linse & Stegbauer 1976b] charakteristisch.

Im Bereich geringer Beanspruchungsintensitäten nimmt die Längsstauchung von Normalbeton nahezu proportional mit steigender Druckspannung zu, sodass in diesem Bereich für Normalbeton und auch für Porenbeton häufig ein linearer Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen unterstellt wird. Dies ist unter anderem auf den geringen Anteil an Kriechverformungen und bei Porenbeton auf die geringe Kriechwilligkeit insgesamt zurückzuführen. In [Freudenthal 1955] wird die Elastizitätsgrenze materialübergreifend als Funktion der Beobachtungsgenauigkeit aufgefasst und dargelegt, dass diese streng genommen bei null liegt.

Entsprechend den Zuwächsen an Längs- und Querverformungen ergibt sich eine Änderung des Probekörpervolumens, Abb. 3.7c. Mit steigender Beanspruchung ist bis zu einer materialabhängigen Beanspruchungsintensität eine Volumenabnahme festzustellen [Shah & Chandra 1968, Kupfer 1973, Linse & Stegbauer 1976 b, Iravani & MacGregor 1998, Basche et al. 2003].

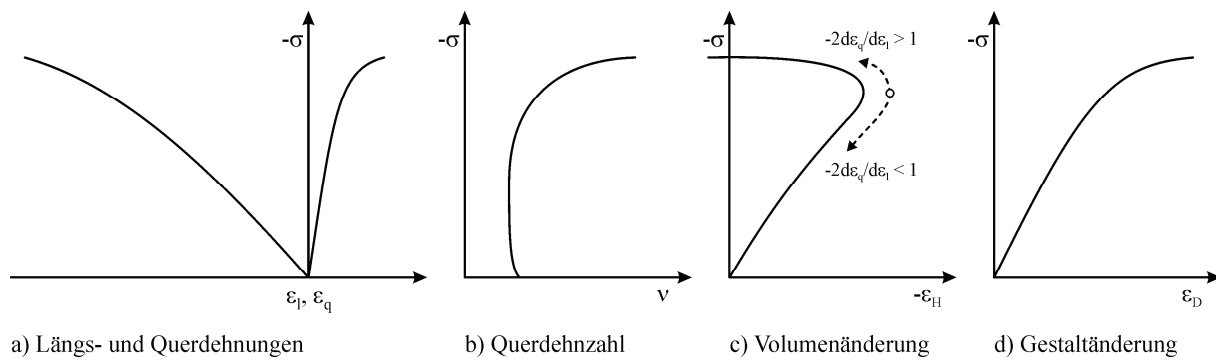


Abb. 3.7: Zusammenhänge zwischen Längsspannung und Verformungsgrößen für Normalbeton und Porenbeton bei monoton gesteigerter Belastung

Erreicht das Verhältnis der Zuwächse den Wert

$$\frac{-2 \cdot d\varepsilon_q}{d\varepsilon_l} = 1,0, \quad (3.3)$$

ergibt sich Volumenkonstanz, der Endwert der Materialverdichtung ist erreicht. Ein weiterer Anstieg dieses Verhältniswertes führt bezogen auf das erreichte Volumenminimum makroskopisch zu einer Zunahme des Probekörpervolumens, wobei das Ausgangsvolumen wieder erreicht werden kann.

Die relative Volumenzunahme unmittelbar vor dem Versagen tritt bei Zementstein nicht bzw. weniger ausgeprägt in Erscheinung als bei Normalbeton [Shah & Chandra 1968, Spooner 1972, Linse & Stegbauer 1976b]. An Porenbeton wurden unterschiedliche Beobachtungen gemacht: sowohl eine Abnahme des Volumens bis zum Versagen [Sell 1970] als auch eine geringfügige relative Volumenzunahme unmittelbar vor dem Versagen [Linse & Stegbauer 1976b].

Ein solcher Extremwert kann im Funktionsverlauf für die Gestaltänderungen, Abb. 3.7d, definitionsgemäß nicht auftreten (Gl. 2.41). Die Gestaltänderungen nehmen mit steigender Beanspruchung bis zum Versagen monoton zu [Kupfer 1973, Linse & Stegbauer 1976b].

Unter Vernachlässigung zeitabhängiger Effekte lässt sich aus den Spannungs-Dehnungs-Zusammenhängen unmittelbar auf die Nachgiebigkeit bzw. *Steifigkeit* des Materials schließen. In Abb. 3.8 sind Elastizitätsmodul, Gleitmodul und Kompressionsmodul als Tangentenmoduln dargestellt. Der Elastizitätsmodul und der Gleitmodul nehmen mit steigender Beanspruchungsintensität bis zum Versagen ab. Demgegenüber sinkt die Kompressionssteifigkeit mit steigender Beanspruchungsintensität zunächst, nimmt aber vor Erreichen des Volumenminimums wieder zu [Kupfer 1973, Linse & Stegbauer 1976b]. Dieser „Steifigkeitszuwachs“ ist auf strukturelle Änderungen zurückzuführen und stellt lediglich eine scheinbare Erhöhung des Kompressionsmoduls dar. Die Ursachen dieses Phänomens sowie der makroskopischen Volumenzunahme werden in Kapitel 5.3 diskutiert.

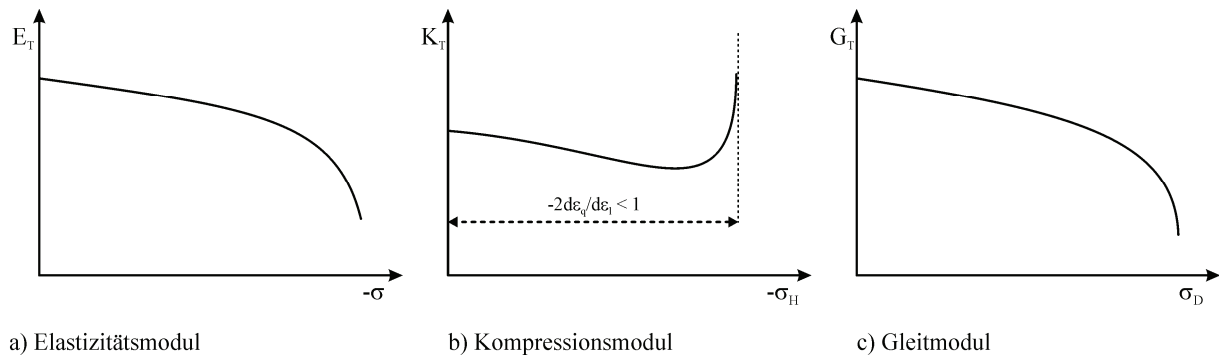


Abb. 3.8: Tangentensteifigkeiten für Normalbeton und Porenbeton bei monoton gesteigerter Belastung

Bei inelastischem Materialverhalten spiegelt sich im Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Funktionen zusätzlich die Zeitabhängigkeit des Materialverhaltens wider (Kapitel 4), sodass gegebenenfalls erhebliche Differenzen zur elastisch begründeten Steifigkeit auftreten können. Der Grad der Beeinflussung richtet sich wesentlich nach der Kriechfähigkeit des Materials. Ein entsprechender Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die ermittelte Steifigkeit ist somit vorhanden. In diesem Fall kann die durch Elastizität begründete Steifigkeit nicht mit einmaliger, monoton gesteigerter Belastung ermittelt werden.

In der Praxis kommt der Druckspannungs-Längsstauchungs-Beziehung von Normalbeton und Porenbeton bei monoton steigender Beanspruchung als *Arbeitslinie* zur Charakterisierung des Materialverhaltens eine besondere Bedeutung zu. Zu beachten ist, dass sich in der Arbeitslinie auch die versuchstechnischen Gegebenheiten widerspiegeln. Naturgemäß müssen sich alle zuvor, im Zusammenhang mit den Widerständen diskutierten Randbedingungen auch auf die Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge auswirken.

Für die Form der experimentell bestimmten Spannungs-Dehnungs-Linie ist die Wahl der *Regelungsart* von ausschlaggebender Bedeutung. Während bei Kraftregelung der Versuch unmittelbar bei Erreichen der Maximallast beendet ist, ergibt sich beim verformungsgeregelten Versuch ein abfallender Ast für die Spannungs-Dehnungs-Funktion.

Einen wesentlichen Einfluss auf die versuchstechnisch zu ermittelnde Spannungs-Dehnungs-Beziehung hat weiterhin die *Beanspruchungsgeschwindigkeit*. Entsprechend Abb. 3.9a sind bei Normalbeton die Längsstauchungen bei Maximallast umso kleiner und der Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Beziehung umso größer, je zügiger die Beanspruchung gesteigert wird. Die Werte für die maximale Spannung und die zugehörige Verformung variieren materialabhängig. Die Verformungen im Versagenszustand lassen keine eindeutige Abhängigkeit von der Beanspruchungsgeschwindigkeit erkennen [Bischoff & Perry 1991].

In Bezug auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Porenbeton wurde der Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit in der Vergangenheit unterschiedlich diskutiert. Grabiec et al. (1973) führten kraftgeregelte Versuche an Porenbeton verschiedener Festigkeitsklassen mit moderater Belastungsgeschwindigkeit durch. Die Ergebnisse lassen eine Analogie zum zuvor beschriebenen Verhalten des Normalbetons unter verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten erkennen. Demgegenüber konnte

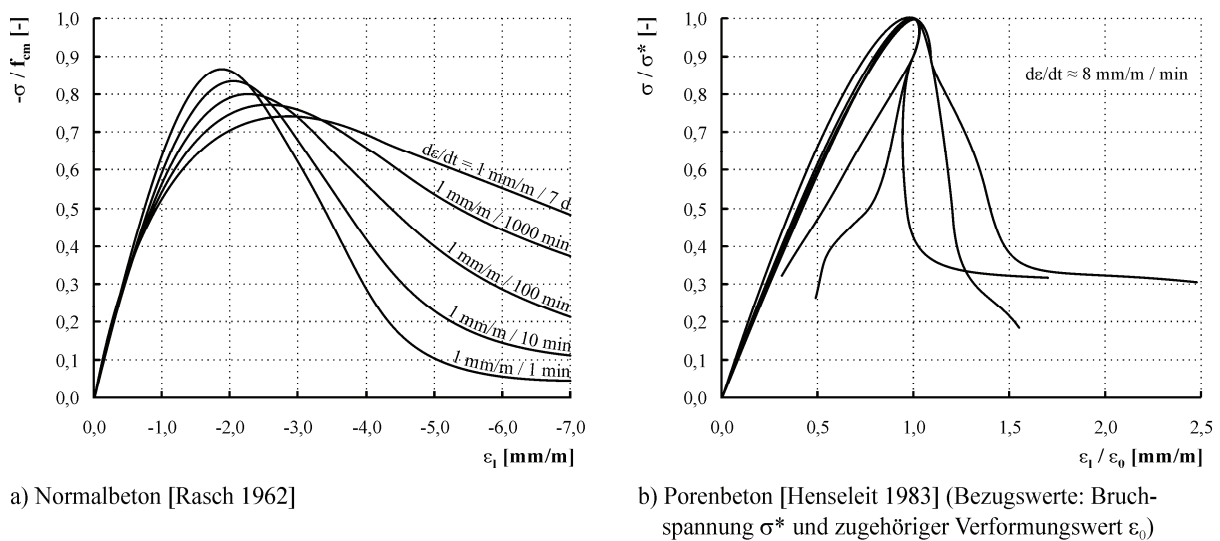


Abb. 3.9: Normierte Arbeitslinien für Normalbeton und Porenbeton bei monoton gesteigerter Beanspruchung

Henseleit (1983) auf der Basis eigener, verformungsgeregelter Versuche mit vergleichsweise hohen Dehnraten keinen Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten feststellen.

Eine Interpretation der in [Henseleit 1983] veröffentlichten Ergebnisse wird dadurch erschwert, dass lediglich normierte Kurvenverläufe abgedruckt wurden, Abb. 3.9b. Die Kurven lassen dennoch darauf schließen, dass das Probekörperversagen unmittelbar nach Erreichen der Maximallast eingetreten sein muss. Den in Abb. 3.9b dargestellten „abfallenden Ästen“ kann folglich keine weitere Bedeutung beigemessen werden.

Das Verhalten nach Erreichen der Maximallast, das *Nachbruchverhalten*, wird von Rissausbreitungsprozessen dominiert. Die Form der Arbeitslinie hängt in dieser instabilen Phase maßgeblich davon ab, wie die Rissausbreitung durch stoffliche und versuchstechnische Gegebenheiten verzögert werden kann. Neben der Regelungsart, der Beanspruchungsgeschwindigkeit und der Materialbeschaffenheit sind unter anderem die Gestalt der Probekörper und die Beschaffenheit der Druckplatten [Schickert 1980, Kotsovos 1983, van Mier 1986], die Steifigkeit der Prüfmaschine [Sigvaldason 1964, Siebel 1989, Blaschke 1993] sowie bei exzentrischer Beanspruchung die Querschnittsform [Scholz 1961, Rasch 1962] von Bedeutung. In Bezug auf die Größe der gemessenen Verformungswerte ergibt sich zusätzlich eine Abhängigkeit von der gewählten Messlänge und Messbasis [Müller 1964, van Mier 1986, Siebel 1989]. Folglich ist zu überdenken, ob der abfallende Ast der Arbeitslinie als Materialeigenschaft aufgefasst werden kann [Kotsovos 1983].

Die Wahl der Messlänge ist nicht ausschließlich für den abfallenden Ast, sondern für den gesamten Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie von Bedeutung. Um den Einfluss versuchstechnischer Randbedingungen auf die Verformungsmessung zu minimieren, sollten Verformungsmessungen unmittelbar am Probekörper und in entsprechendem Abstand von den Druckplatten der Prüfmaschine erfolgen. Bei Normalbeton sollte dieser Abstand etwa dem Durchmesser bzw. der Dicke des Probekörpers entsprechen [Schleeh 1975a, b, Taheri & Hazivar 1986].

Andererseits muss der Probekörperbereich, in dem die Verformungen ermittelt werden sollen, eine Mindestgröße aufweisen, damit die makroskopisch ermittelte Verformung als mittlere Dehnung aufgefasst werden kann. Die Festlegung der Mindestgröße, der *Repräsentativen Volumeneinheit (RVE)*, erfolgt bei Normalbeton in Abhängigkeit von der maximalen Korngröße. Entsprechend [Newman 1964, Häußler-Combe 2006] sollte die Mindestkantenlänge der RVE das 4- bis 5-fache des Größtkorndurchmessers betragen. Bei Porenbeton ist die makroskopisch sichtbare Heterogenität des Materials wesentlich durch die Makroporen bestimmt, deren Durchmesser etwa 2 mm beträgt. Die repräsentative Volumeneinheit weist bei Porenbeton folglich eine Mindestkantenlänge von 1 cm auf.

Die vorgenannten Untersuchungen zum Einfluss der versuchstechnischen Gegebenheiten auf die Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge stützen sich im Wesentlichen auf die Auswertung der Längsverformungen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, dass die vorgenannten Einflüsse eine entsprechende Wirkung auf das Gesamtdeformationsverhalten haben. Sie werden bei der Konzeption der eigenen experimentellen Untersuchungen dementsprechend berücksichtigt.

3.3.2.2 Ruhende Belastung

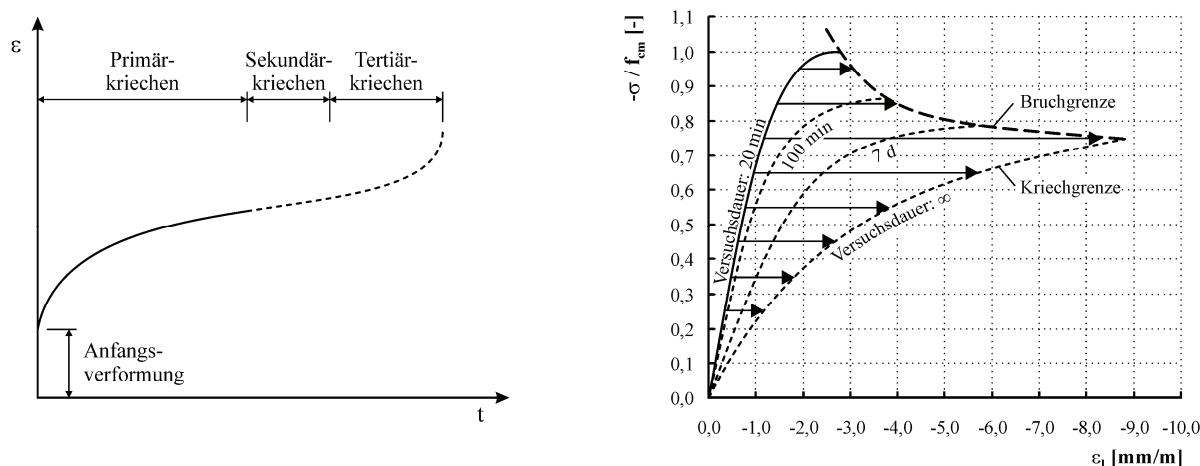
Bei konstant gehaltener Belastung treten die Kriechverformungen von Normalbeton und Porenbeton besonders in Erscheinung. Das Kriechen beschreibt die zeitabhängige Zunahme der Längs- und Querverformungen. Diese Zunahme der Deformation geht mit strukturellen Änderungen einher, die wiederum eine zeitabhängige Änderung der *elastischen* Eigenschaften bewirken.

Der zeitliche Verlauf des Kriechens von Normalbeton wird allgemein in Primär-, Sekundär- und Tertiärkriechen separiert, Abb. 3.10a. Bei niedrigen Beanspruchungsintensitäten ist lediglich das *Primärkriechen* zu beobachten, bei dem die anfänglich rasche Verformungszunahme mit fortschreitender Lasthaltezeit abklingt. Auf höherem Lastniveau streben die Verformungen nicht mehr asymptotisch einem Endwert entgegen. Die Phase konstanter Verformungsgeschwindigkeit wird als *Sekundärkriechen* bezeichnet. Vor Eintreten des Versagens wird das *Tertiärkriechen* beobachtet, das durch eine zunehmende makroskopische Verformungsgeschwindigkeit gekennzeichnet ist.

Das Tertiärkriechen tritt ausschließlich bei Belastungen oberhalb der Dauerstandfestigkeit des Normalbetons auf [Müller 1986, Streit 1991, Shen 1992]. In dieser Kriechphase schreiten die Strukturänderungen in Form von Rissen zügig voran, sodass die Messwerte nicht als reine Dehnungen angesehen werden können. Diese Phase wird deshalb nicht mehr als reiner Deformationsprozess, sondern als beginnender bzw. voranschreitender Bruch aufgefasst [Freudenthal 1955, Smadi & Slate 1989, Streit 1991]. Damit stellt sich die Frage, inwiefern sich das Sekundärkriechen, das den Übergang zum Tertiärkriechen darstellt und ebenfalls von voranschreitenden strukturellen Änderungen begleitet ist, über einen längeren Zeitraum erstrecken kann.

In Abb. 3.10b sind am Beispiel von Normalbeton die Grenzdehnungen dargestellt, denen die Längsverformungen in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität entgegenstreben (Kriechgrenze). Weiterhin wurde die Grenzkurve für hohe Belastungen (Bruchgrenze) aus der Literatur übernommen. Mit dieser Grenzkurve wird unterstellt, dass das Betonversagen, unabhängig vom Last-Zeit-Regime, an beanspruchungsintensitätsabhängige Gesamtlängsdeformationen gebunden ist.

Bei der Modellbildung wird im Allgemeinen zwischen Kurzzeit- und Langzeitverformungen unterschieden. Die Kriechverformungen werden dabei als Vielfaches des elastischen Verformungsanteils angegeben. Im unteren Beanspruchungsbereich von etwa 45 % der Kurzzeitdruckfestigkeit wird ver-



a) allgemeiner Zeit-Verformungs-Zusammenhang für Beton und Porenbeton unter hoher konstanter Dauerlast

b) Grenzdehnung von Beton in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität und -geschwindigkeit [Rüsch 1960]

Abb. 3.10: Kriechphasen, Grenzdehnungen für Normalbeton

einfachend von einem proportionalen Zusammenhang zwischen Kriechverformung und kriecheerzeugender Spannung, d. h. linearem Kriechen, ausgegangen. Überschreiten die Beanspruchungen dieses Spannungsniveau, ist diese Annahme nicht mehr gültig, die Verformungen nehmen überproportional zu.

Die Größe der Kriechverformungen hängt von zahlreichen Parametern ab. Für Normalbeton sind im Gebrauchslastbereich für die Längsverformungen Endkriechzahlen von 2...3 und darüber typisch [Grübl et al. 2001, Betonkalender 2002]. Eine Prognose der Kriechverformungen von Normalbeton kann unter Berücksichtigung der zu erwartenden Randbedingungen z. B. nach [Zilch 2003] vorgenommen werden. Porenbeton besitzt im Unterschied zu Normalbeton ein geringeres Kriechvermögen [Grabiec et al. 1973, Wittmann & Zaitsev 1974, Daschner & Zilch 2001]. Nach DIN EN 12602 (2006) wird für Porenbeton im Gebrauchslastbereich ($0 \leq \sigma \leq 0,40 f_{cm}$) eine Endkriechzahl von $\varphi_{\infty} = 1,0$ angenommen, d. h. der zeitabhängige Verformungszuwachs entspricht großenteils etwa der elastischen Anfangsverformung.

Auf der Grundlage der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuche mit ruhender Belastung wird dargelegt, wie sich die zeitabhängigen Verformungen im Bereich hoher Beanspruchungsintensitäten entwickeln. Dabei werden neben den Längsstauchungen auch die Querdehnungen, Querdehnzahlen, Volumenänderungen und Gestaltänderungen analysiert.

3.3.2.3 Zyklisch eingetragene Belastung

In den experimentell ermittelten Gesamtdeformationen sind elastische und inelastische Formänderungsanteile enthalten. Die inelastischen Verformungen werden häufig je nach Ursache (Rissbildung, Dämpfung, Reibung etc.) in weitere Komponenten zerlegt. Die Größe und das Verhältnis der Verformungsanteile untereinander sind materialabhängig und richten sich maßgeblich nach der Beanspruchungsgeschichte. Die einzelnen Verformungskomponenten lassen sich separieren, wenn die Beanspruchung in Zyklen vorgenommen wird. Änderungen der Steifigkeit treten dabei auf den Be- und Entlastungspfaden, die zeitabhängigen Verformungen in den Lasthalte- und Erholungsphasen in Erscheinung.

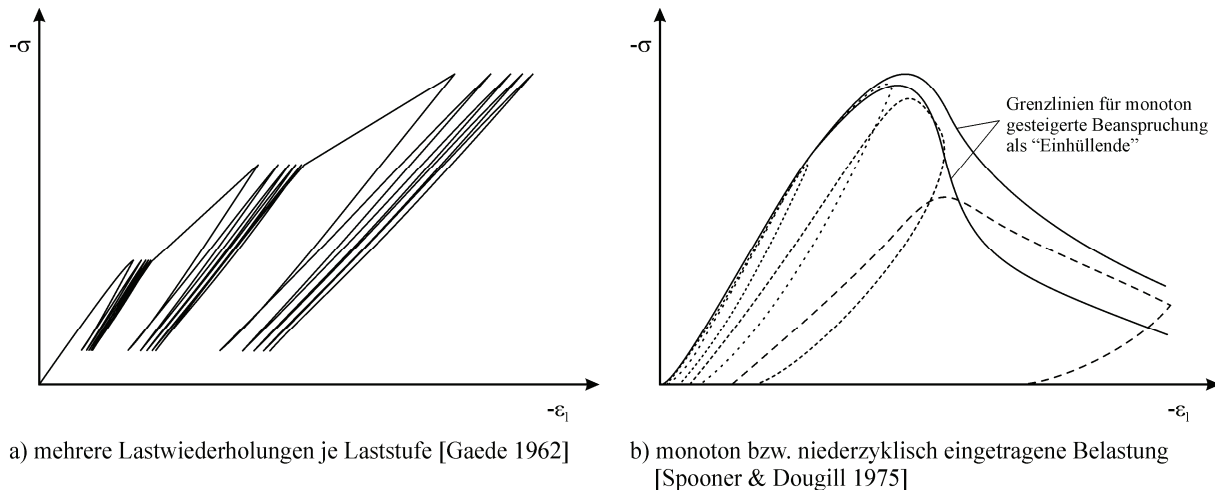


Abb. 3.11: Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge für Normalbeton

Experimentelle Untersuchungen an Normalbeton zeigen, dass wiederholte Beanspruchungen Änderungen der Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge zur Folge haben. Laut [Mehmel & Kern 1962, Gaede 1962] tritt ein großer Anteil dieser Änderungen bei Erstbelastung auf. Bereits nach wenigen Lastwiederholungen stellt sich eine weitgehend stabile Hysterese ein. Weitere irreversible Formänderungen werden durch Erhöhung der Beanspruchungsintensität hervorgerufen, Abb. 3.11a. Dabei zeigt sich, dass sich die Völligkeit und die Krümmung des Belastungsastes der Spannungs-Dehnungs-Funktion und damit die Steifigkeit des Normalbetons beanspruchungsabhängig ändern. Neben der beanspruchungsbedingten Mikrorissbildung wird als Ursache hierfür vordergründig die Wechselwirkung zwischen der festen und der viskosen Phase des Normalbetons angesehen.

Auf die Ergebnisse der Untersuchungen von [Sinha et al. 1964, Karsan & Jirsa 1969, Spooner & Dougill 1975] stützt sich die Annahme, dass die Arbeitslinie des Betons bei monoton gesteigerter Beanspruchung näherungsweise als *Einhüllende* der Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge bei zyklisch eingetragener Beanspruchung aufgefasst werden kann, Abb. 3.11b.

Das Prinzip wiederholter Belastung wird bei den eigenen experimentellen Untersuchungen an Porenbeton angewendet, um Strukturänderungen nachzuweisen und um deren Akkumulation zu analysieren, wobei Längsstauchungen, Querdehnungen, Volumenänderungen und Gestaltänderungen herangezogen werden.

3.4 Tragwirkung und Strukturänderungen

Die zuvor geschilderten Interpretationen zum Materialverhalten basieren im Wesentlichen auf kontinuumsmechanischen Vorstellungen. Dabei wird von makroskopisch homogenen Spannungs- und Verformungszuständen ausgegangen. Für die Deutung der festgestellten Phänomene sind makroskopische Betrachtungen jedoch vielfach nicht ausreichend, da die Nichtlinearität des Tragverhaltens in Mechanismen und Strukturänderungen auf mikroskopischer Ebene begründet ist.

Das nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Normalbeton hängt eng mit Rissbildungs- und Rissausbreitungsprozessen zusammen, die auf lokal auftretende Zugspannungen zurückgeführt werden können. Auf der Grundlage mesoskopischer Modellvorstellungen kann der Kräftefluss im Betongefüge veranschaulicht und damit gezeigt werden, wodurch diese Zugspannungen verursacht werden.

3.4.1 Tragwirkung und Bruchverhalten

Der makroskopisch als homogen angesehene Werkstoff Normalbeton stellt aus mesoskopischer Sicht ein Mehrstoffsystem dar. Vereinfachend werden im Allgemeinen zwei Phasen, Zuschlagkorn und Mörtelmatrix unterschieden. Das Zusammenwirken der Phasen prägt maßgeblich das makroskopische mechanische Erscheinungsbild. In Bezug auf den inneren Spannungsverlauf ergeben sich aufgrund der Materialzusammensetzung für Normalbeton und Leichtbeton unterschiedliche Verhältnisse. Dies wirkt sich unmittelbar auf die Rissbildung und Rissausbreitung aus.

Das Versagen von Normalbeton unter einachsiger Druckbelastung wird primär auf das Erreichen der Zugfestigkeit zurückgeführt. Erhöhte Spannungen treten an Unregelmäßigkeiten im Gefüge auf. Lokal können die Spannungen und Verformungen ein Mehrfaches des makroskopischen Mittelwertes betragen [Sawin 1956, Wischers 1967, Swamy 1971, Lusche 1972]. Zusätzlich ist der Materialwiderstand in der Kontaktzone, der durch die Haftzugfestigkeit zwischen Matrix und Zuschlagkorn vorgegeben ist, vergleichsweise gering und bereits durch Temperatureinflüsse und den Schwindprozess beansprucht bzw. gestört [Hsu & Slate 1963, Taylor & Broms 1964, Mc Creath et al. 1969, Plannerer 1998]. Für die Rissbildung maßgeblich sind die Verhältnisse an den Korngrenzen. Untersuchungen von Kotsovos (1983) haben weiterhin gezeigt, dass die Rissbildung zunächst in den Bereichen der Probekörper einsetzt, die von der Querdehnungsbehinderung durch die Druckplatten der Prüfmaschine weniger beeinflusst werden.

Die weitere Entwicklung der Risse wird wesentlich von den Steifigkeitsverhältnissen und dem davon beeinflussten Spannungsverlauf im Gefüge bestimmt. Während die Zuschlagkörner im Vergleich zur Matrix bei Normalbeton eine höhere Steifigkeit aufweisen, besitzen diese bei Leichtbeton eine geringere Steifigkeit, weshalb sich bei Leichtbeton die Zuschlagkörner der inneren Lastabtragung teilweise entziehen, Abb. 3.12b. Die vergleichsweise hohe Festigkeit der Normalbetonzuschläge hat zur Folge, dass die Risse entlang der Zuschläge verlaufen und diese nicht durchtrennen, Abb. 3.12a. Bei Leichtbeton wird im Allgemeinen Kornbruch beobachtet, Abb. 3.12b.

In [Glücklich 1965, Lusche 1972] werden, unabhängig vom Rissverlauf an den Zuschlägen, für Normal- und Leichtbeton vier signifikante *Bruchabschnitte* unterschieden: Rissbildung in der Kontaktzone zwischen Matrix und Zuschlägen (1), Verlängerung der Risse in die Matrix (2), Entstehung von Längsrissen, die den gesamten Körper in Richtung der äußeren Druckbelastung durchziehen (3), Eintreten des Gesamtversagens (4). Aufgrund der ausgeprägten Längsrissbildung ist makroskopisch bei beiden Betonarten vor dem Versagen eine signifikante Zunahme der Querverformungen festzustellen, die Querdehnzahl steigt an.

Der im Vergleich zu den Längsstauchungen überproportionale Anstieg der Querdehnungen vor dem Versagen wurde bei Porenbeton zunächst nicht beobachtet bzw. nicht beachtet. Deshalb wurde von Sell (1970) eine Vorstellung zum Bruchmechanismus entwickelt, um zu erklären, warum das Versagen bei nahezu konstanter Querdehnzahl, monoton abnehmendem Probekörpervolumen und ohne Vorankündigung eintrat und kein Einfluss der Probekörperschlankheit auf die Druckfestigkeit festzu-

3.4.2 Phasen struktureller Änderungen, Schwellenwerte

In der Vergangenheit wurden zahlreiche Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, die strukturellen Änderungen sowie deren Akkumulation zu erfassen und charakteristische Phasen des Tragverhaltens von Normalbeton durch *Schwellenwerte* voneinander abzugrenzen. Eine Vielzahl der Untersuchungen stützt sich auf das Studium des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens bei monoton steigender Beanspruchung, wobei zum Teil ergänzende Beobachtungen bzw. Messungen zu den Rissmechanismen und deren Einfluss auf entsprechende Materialeigenschaften vorgenommen wurden. Diese Untersuchungen haben wesentlich zum Verständnis der mechanischen Vorgänge in der Meso- und Mikrostruktur des Normalbetons beigetragen.

Freudenthal (1955) weist darauf hin, dass bei allen mehrphasigen Stoffen viele aufeinanderfolgende Schwellenwerte existieren, die von irreversiblen Übergängen im Materialverhalten gekennzeichnet sind. Folglich sind je nach Fragestellung Kriterien zu ermitteln, anhand derer sich einzelne Schwellen beurteilen lassen.

Eine allgemeine Einteilung der Phasen der Rissbildung basiert auf der Beobachtung der Rissbilder [Glücklich 1965, Lusche 1972]. Systematische Untersuchungen zum Einfluss struktureller Änderungen auf das mechanische Verhalten von Normalbeton und eine Abgrenzung einzelner Phasen sind in [Rüsch 1959, Berg et al. 1971, Schickert 1980, Bongers 1998] beschrieben. Die Schwellenwerte werden im Allgemeinen Beanspruchungsintensitäten zugeordnet, die sich auf die einachsige Kurzzeitfestigkeit beziehen. Damit ist ein mischungsübergreifender Vergleich möglich.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden lediglich zwei elementare Phasen des Materialverhaltens unterschieden: stabiles und instabiles Tragverhalten. Die Grenze wird bei statischer Belastung durch die *Dauerstandfestigkeit* bzw. *Dauerstandschwelle* vorgegeben. Versuche zum Nachweis der Dauerstandfestigkeit sind an einen hohen Zeitaufwand gebunden. Verfahren, mit denen innerhalb einer vergleichsweise kurzen Zeitspanne Informationen zum Langzeitrtragverhalten zur Verfügung gestellt werden können, nehmen deshalb eine besondere Stellung ein.

In Abhängigkeit vom Material und den damit zusammenhängenden Deteriorationsprozessen wurden in der Vergangenheit unterschiedliche Konzepte zur Bewertung des Langzeitrtragverhaltens auf der Grundlage von Kurzzeitversuchen verfolgt. Den Verfahren liegen unter anderem Extrapolationsansätze oder Methoden zu Grunde, die die strukturellen Änderungen vorantreiben sollen. Derartige Verfahren kommen z. B. bei Holz [DIN V ENV 1156 (1999)], glasfaserverstärkten Kunststoffen [DIN 53769 (1986)], thermoplastischen Kunststoffen [DIN 16887 (1990)] und glasfaserbewehrtem Beton [Schorn et al. 2003] zur Anwendung. Diese Konzepte werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht verfolgt. Die nachfolgenden Darlegungen stützen sich auf makroskopische Materialreaktionen, die bereits im Kurzzeitversuch Rückschlüsse auf maßgebliche Strukturänderungen zulassen.

Anhand der qualitativen Verläufe der in Abb. 3.13 dargestellten Funktionen, die sich auf das Verhalten von Normalbeton unter monoton steigender Belastung beziehen, lassen sich einige *Schwellenwerte* hervorheben.

Der *erste Schwellenwert* beruht auf dem Minimum im Funktionsverlauf der Querdehnzahl. Ab der zugeordneten Beanspruchungsintensität nehmen die Querdehnungen im Verhältnis zu den Längsstauchungen überproportional zu. Diese Entwicklung setzt sich bis zum Versagen des Probekörpers fort.

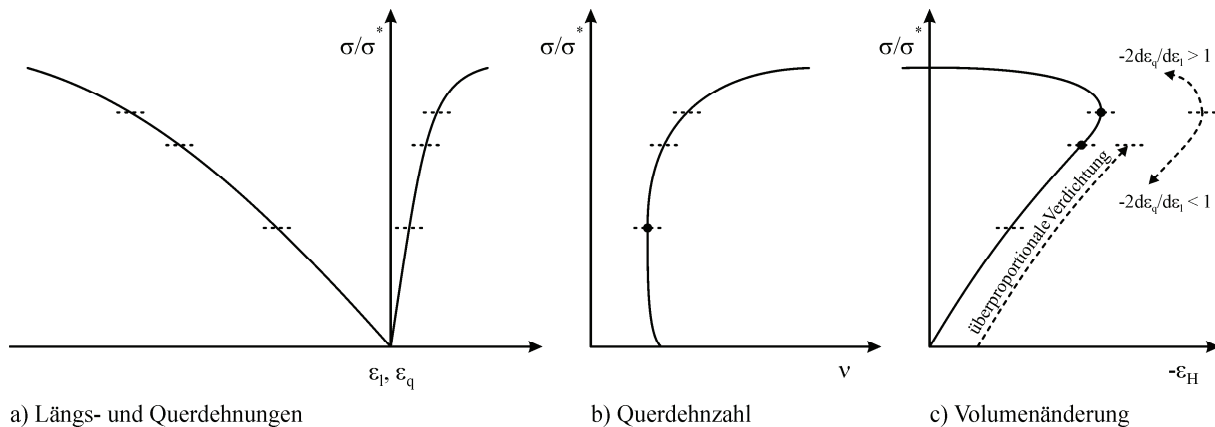


Abb. 3.13: Phasen der Strukturänderungen bei Normalbeton unter monoton steigender Belastung

Ein *zweiter Schwellenwert* lässt sich aus der Funktion der Volumenänderungen, gekennzeichnet durch den Wendepunkt, ableiten. Bis zu der zugeordneten Beanspruchungsintensität wird das Material mit steigender Beanspruchung überproportional verdichtet. Dieser Punkt tritt deutlich sichtbar durch das Minimum im Kurvenverlauf des Kompressionstangentenmoduls in Erscheinung, Abb. 3.8b.

Nach Überschreiten der zugehörigen Lastschwelle nimmt das Volumen bis zum *dritten Schwellenwert*, bei dem das Volumen das absolute Minimum erreicht, weiter ab, wobei der Gradient für die Volumenabnahme kleiner wird. Die sich anschließende Phase ist von einer relativen Volumenzunahme begleitet, die auf die Auflockerung des Gefüges durch Längsrisse zurückzuführen ist.

Weitere Schwellenwerte, die sich z. B. auf das Erreichen des Ausgangsvolumens, den Versagenseintritt oder die Maximallast im weggelegten Versuch beziehen können, lassen sich herausstellen. Sie sind im Sinne der Arbeit aber ohne Bedeutung.

Für die Bewertung der Rissentwicklung hat die Analyse der Volumenänderungen eine besondere Bedeutung. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich beim Wendepunkt im Funktionsverlauf für die Volumendehnungen (zweiter Schwellenwert) eine qualitative Änderung bezüglich der Rissbildung vollzieht [Newman 1964, Berg 1968, Opitz 1968]. Die zugeordnete Lastintensität wird als *Diskontinuitätsgrenze* aufgefasst.

Zur Abgrenzung der stabilen von der instabilen Phase der Rissentwicklung wurde in zahlreichen Veröffentlichungen das Minimum des Probekörpervolumens (dritter Schwellenwert) herangezogen und die zugeordnete Spannung als *kritische Spannung* bezeichnet [Brandtzaeg 1927, Shah & Chandra 1968, Berg et al. 1971, Kotsovos 1980, Bongers 1998]. Dabei wurde ein direkter Zusammenhang zwischen der Dauerstandfestigkeit und der kritischen Spannung, bei der eine maßgebliche Intensivierung der Rissentwicklung initiiert wird, angenommen.

Mit Untersuchungen an Zementstein oder Betonen höherer Festigkeit konnte dieser Zusammenhang nicht bestätigt werden, da das minimale Probekörpervolumen bei sehr hohen Beanspruchungsintensitäten bzw. bei Versagenseintritt festgestellt wurde [Shah & Chandra 1968, Spooner 1972, Iravani & MacGregor 1998, Basche et al. 2003, Rogge 2003]. Ein entsprechender Einfluss der Mischungszusammensetzung auf die Rissentwicklung und die Lage des Minimums ist somit vorhanden. Untersu-

chungsergebnisse von Bischoff & Perry (1995) legten zudem offen, dass die Lage des Volumenminimums empfindlich auf Variationen der Beanspruchungsgeschwindigkeit reagiert. Das Minimum wurde sowohl bei moderater als auch bei sehr hoher Beanspruchungsgeschwindigkeit zwischen 85 % und 95 % der jeweiligen Bruchlast (statisch bzw. dynamisch) festgestellt. Die Bedeutung der Dilatanz als Kennzeichen für das unmittelbar bevorstehende Versagen von einachsig auf Druck beanspruchtem Beton ist dennoch bislang unbestritten.

Andere Vorschläge stützen sich auf einen Knickpunkt bzw. Wendepunkt, der sich in der Spannungs-Längsstauchungs-Funktion zwischen 77 % und 85 % der Höchstlast abbildet, wenn diese doppelt- bzw. halblogarithmisch aufgetragen wird [Desayi & Viswanatha 1967, Schickert 1980]. Inwiefern dieser Knick- bzw. Wendepunkt auf mechanisch relevante Änderungen des Betongefüges zurückzuführen ist, die mit der Dauerstandfestigkeit in Verbindung gebracht werden können, bleibt offen.

In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass die Spannungs-Dehnungs-Funktionen, anhand derer die zuvor beschriebenen Schwellenwerte ermittelt wurden, selbst maßgeblich von der Versuchsdurchführung beeinflusst werden. Der Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die Form der Spannungs-Längsdehnungs-Linie wird deshalb in Kapitel 4 noch ausführlich dargelegt. Aus dem Funktionsverlauf der Querdehnzahl bei steigender Beanspruchung lässt sich ableiten, dass sich Längs- und Querverformungen nicht in einem festen Verhältnis zueinander entwickeln. Damit ist die Lage der in Abb. 3.13 dargestellten Schwellenwerte, die sich grundsätzlich auf einen Zusammenhang zwischen Längs- und Querverformungen beziehen, von der Beanspruchungsgeschwindigkeit abhängig. Der Grad der Beeinflussung richtet sich unter anderem nach der Materialbeschaffenheit und lässt sich nicht allgemeingültig beurteilen.

Eine ergänzende und häufig angewendete Untersuchungsmethode bezieht sich auf die Analyse von *Ultraschallsignalen*. Diese Untersuchungen stützen sich auf die Überlegung, dass sich die Durchgangszeit der Ultraschallwellen senkrecht zur äußeren Lastrichtung aufgrund von Längsrissen vergrößern und sich der Frequenzgehalt der Signale insgesamt ändern muss [Jones 1952, Rüschi 1959, Berg et al. 1971, Spooner & Dougill 1975, Suaris & Fernando 1987, Klemm 2000, Raue et al. 2003].

Messungen zu Schallemissionen lassen zudem Rückschlüsse auf die Intensität der Rissbildung zu [Rüschi 1959, Spooner & Dougill 1975, Schickert 1980, Bischoff et al. 1991]. Es ist naheliegend, dass aufgrund des jeweils gewählten Untersuchungsprinzips und der verfahrensabhängigen Empfindlichkeit der Messgeräte die Ergebnisse unterschiedlich in Bezug auf das Ausmaß struktureller Änderungen bei entsprechenden Beanspruchungsgraden interpretiert werden. Eine Bewertung der Dauerstandfestigkeit, die sich auf derartige Messungen stützt und materialübergreifend anwendbar ist, erscheint schwierig.

Weitere Untersuchungen beziehen sich auf Versuche mit *wiederholter Beanspruchung*. Dabei hat sich herausgestellt, dass Beanspruchungen irreversible Änderungen der Spannungs-Dehnungs-Verläufe und des Elastizitätsmoduls bewirken [Gaede 1962, Mehlhorn & Kern 1962, Sinha et al. 1964, Karsan & Jirsa 1969, Spooner et al. 1976, Mazzotti & Savoia 2002]. Dies wird auf das Zusammenwirken von Gesteinskorn und Mörtelmatrix sowie Rissmechanismen zurückgeführt. Ein Maß zur Beurteilung des Übergangs zur instabilen Rissentwicklung, das auf der Degradation der Steifigkeit beruht, ist nicht bekannt.

Spooner & Dougill (1975) gehen davon aus, dass der Diskontinuitätsgrenze und der kritischen Spannung keine weitere Bedeutung beigemessen werden kann, und schlagen vor, die strukturellen Änderungen anhand der dissipierten Formänderungsenergie nachzuweisen. Es hat sich herausgestellt, dass sich mit diesen Verfahren bereits geringfügige Strukturänderungen feststellen und deren Akkumulation über die Lastgeschichte verfolgen lassen, wenn die Energie entsprechend Abb. 2.4 in mehrere Anteile zerlegt wird. Für die Beurteilung struktureller Änderungen wird der für irreversible Deformationen und für Dämpfung dissipierte Anteil der Formänderungsenergie herangezogen. Dieses Prinzip zur Quantifizierung struktureller Änderungen wurde später unter verschiedenen Zielsetzungen weiterverfolgt [Siebel 1989, Bolle 1999, Schwabach 2005, Heidolf 2007]. Ein Nachteil dieser Methodik ergibt sich aus dem Umstand, dass die strukturellen Änderungen bis zum Versagen überproportional zunehmen, ohne dass signifikante Belastungsschwellen in den Vordergrund treten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich strukturelle Änderungen durch unterschiedliche Verfahren nachweisen lassen, derzeit aber noch keine experimentell und theoretisch allgemein begründete und anerkannte wissenschaftliche Basis für eine Beurteilung der Dauerstandfestigkeit vorliegt, die sich auf Versuche mit kurzzeitiger Belastung stützt. Die vorangehend dargelegten Ergebnisse früherer Untersuchungen legen den Schluss nahe, dass die Längsrisse einen maßgeblichen Einfluss auf den Deformationszustand und das mechanische Verhalten von Normalbeton besitzen. Dies spiegelt sich insbesondere in der Dominanz der Querverformungen, die sich bei entsprechendem Auslastungsgrad in der Neigung zu dilatantem Verhalten zeigt, wider. Inwiefern sich diese Mechanismen auf das Verhalten von Porenbeton übertragen lassen, ist bislang ungeklärt.

Kapitel 4

Mechanische Modelle

Mit Hilfe mechanischer Modelle können komplexe Materialreaktionen auf der Basis weniger Kenngrößen erklärt werden, sie liefern eine Grundvorstellung zu den Ursachen makroskopisch zu beobachtender Phänomene. In diesem Kapitel wird die zuvor diskutierte Wechselwirkung von Lastgeschichte und Strukturantwort dargelegt und theoretisch interpretiert.

Auf der Grundlage mechanischer Modelle wird gezeigt, dass die elastischen Eigenschaften für die Bewertung der Langzeittragfähigkeit von Beton und Porenbeton von besonderer Bedeutung sind. Ferner wird der Einfluss der Längsrissbildung auf das Tragverhalten erörtert.

4.1 Grundelemente

Aus der klassischen *Rheologie* sind die *Hooke'sche Feder*, das *St. Venant'sche Friktionselement* und der *Newton'sche Dämpfer* bekannt [Reiner 1968]. Zusätzliche Elemente wurden z. B. von Trost (1966), Sobotka (1984) und Shen (1992) eingeführt. Curbach (1987), Eibl & Schmidt-Hurtienne (1998) haben weiterhin das Phänomen der Massenträgheit durch Verwendung von Massepunkten in die Modellbildung einbezogen.

Die *Hooke'sche Feder* stellt den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung für linear-elastisches Verhalten dar, Abb. 4.1. Entsprechend der Materialbeziehung

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4.1)$$

sind der Widerstand und die Verformung der Feder unabhängig von der Zeit und somit unabhängig von Beanspruchungsdauer und Beanspruchungsgeschwindigkeit. Die Verformungen des Federelementes gehen unmittelbar bei Entlastung vollständig zurück.

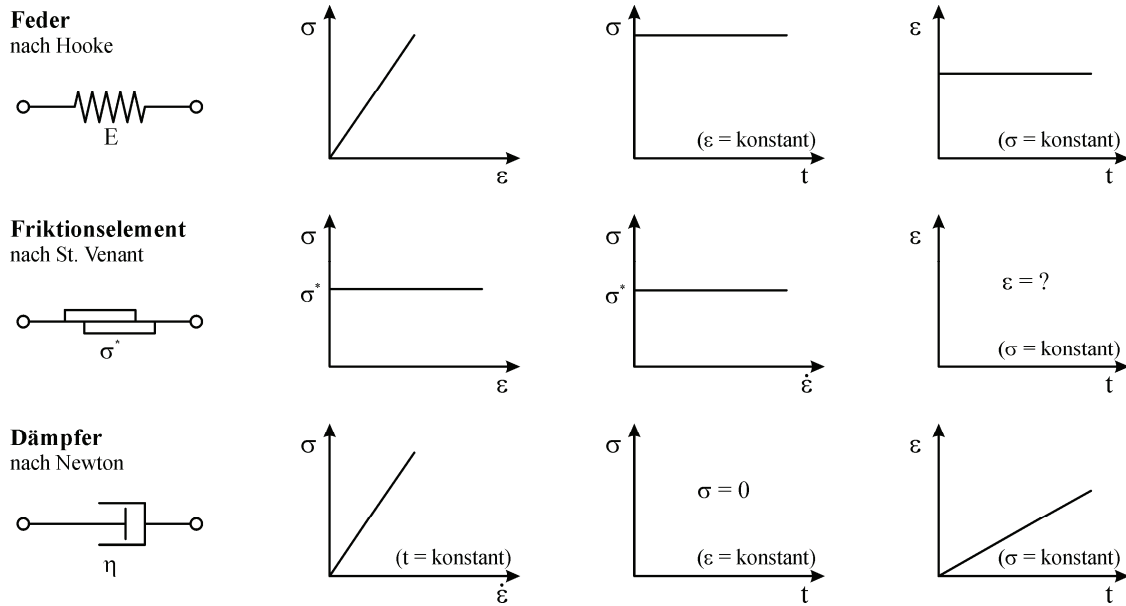


Abb. 4.1: Grundelemente der Rheologie

Mit Hilfe des *Friktionselementes* können zeitunabhängige bleibende Verformungen abgebildet werden, die bei Erreichen einer definierten, auf Spannungen basierenden Schwelle auftreten, Abb. 4.1. Die zu erreichende Maximalspannung ist unabhängig von der Beanspruchungsgeschwindigkeit, der Betrag des Weges bzw. der „Dehnung“ bei Erreichen der Schwelle σ^* ist nicht begrenzt. Für positive Spannungen und Dehnungen gilt

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0 & \text{für } \sigma < \sigma^*, \\ 0 < \varepsilon &\leq \infty & \text{für } \sigma \geq \sigma^*. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Die Zeitabhängigkeit des Materialverhaltens wird durch den mit einer viskosen Flüssigkeit gefüllten *Dämpfer* wiedergegeben. Die „Zähigkeit“ der Flüssigkeit und damit das Verhalten des Dämpfers wird durch die Viskositätszahl η bestimmt. Der Widerstand des Dämpfers ist entsprechend dem zugehörigen Stoffgesetz

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} = \eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad (4.3)$$

proportional zur Verformungsgeschwindigkeit, d. h. nur so lange ungleich null, wie der Dämpfer zeitvarianten Deformationen ausgesetzt ist, Abb. 4.1. Bei sehr kleinen Dehnraten, d. h. $dt \rightarrow \infty$, geht die Tragwirkung des Dämpfers verloren. Bei Entlastung bleibt die gesamte Deformation erhalten.

4.2 Elementgruppen

Die vorgenannten Grundelemente stellen theoretische Sonderfälle dar, mit denen das makroskopisch zu beobachtende, in seinen Erscheinungen komplexe Materialverhalten nur unzureichend beschrieben werden kann. Durch einfache Gruppenanordnung der Grundelemente lassen sich einzelne, materialabhängig auftretende Phänomene modellieren.

4.2.1 Feder-Frictions-Modelle

Durch Kombination von Feder- und Friktionselementen können zeitunabhängige Effekte, die ausschließlich auf das Erreichen von Beanspruchungsschwellen zurückzuführen sind, erklärt werden.

Der nichtlinear beanspruchungsbasierte aber zeitunabhängige Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung lässt sich mit n parallel geschalteten Federn modellieren, Abb. 4.2a. Dabei wird von der Vorstellung ausgegangen, dass das Versagen jedes einzelnen Federelementes bei einer endlichen Dehnung bzw. Spannung eintritt, die nicht für alle Federn des Modells gleich ist. Die zugehörige Spannungs-Dehnungs-Beziehung lässt erkennen, dass der Ausfall einzelner Elemente mit Steifigkeitsdegradationen, nicht aber mit bleibenden Verformungen einhergeht. Bei Wiederbelastung folgt die Spannungs-Dehnungs-Linie dem Entlastungspfad, bis zum Erreichen der Vorbelastungshöhe treten keine weiteren Steifigkeitsänderungen auf. Der E-Modul des Gesamtmodells $E(\varepsilon_{F, \max})$ bzw. $E(\sigma_{F, \max})$ stellt damit eine Funktion der lastgeschichtlich maximalen Beanspruchung $\varepsilon_{F, \max}$ bzw. $\sigma_{F, \max}$ der nichtlinearen Feder dar. Die praktische Relevanz derartiger Effekte liegt im Auftreten von Rissen begründet, das mit Änderungen der Steifigkeit einhergeht.

Mit dem in Abb. 4.2b dargestellten Modell lassen sich unmittelbar eintretende, bleibende Verformungen veranschaulichen, ohne dass sich die Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 der Federn ändern. Ab Erreichen der Schwelle σ^* im Friktionselement ist in diesem Ast des Modells keine weitere Spannungssteigerung möglich. Eine weitere Erhöhung der äußeren Spannung hat bleibende Verformungsanteile zur Folge. Das plastische Potential dieses Modells ist bei Erreichen der Schwelle σ^{**} ausgeschöpft. Im Gegensatz zum zuvor beschriebenen Modell ist der moderatere Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Funktion nicht als Steifigkeitsdegradation zu beurteilen, die in Änderungen der elastischen Eigenschaften begründet ist. Nach Entfernen der äußeren Belastung bleibt im Modell ein Eigenspannungszustand zurück. Die Beanspruchung bewirkt keine Änderungen des Widerstandsvermögens. Nachdem das plastische Potential dieses Modells ausgeschöpft wurde, sind durch höhere Beanspruchungsintensitäten keine weiteren bleibenden Verformungen herbeizuführen.

Beim Modell in Abb. 4.2c treten die Phänomene Steifigkeitsdegradation und plastische Verformung überlagert in Erscheinung. Soweit die Fließgrenze des Friktionselementes erreicht wurde, ergeben sich aufgrund der beanspruchungsabhängigen Steifigkeit der nichtlinearen Feder bleibende Verformungen, deren Größe mit der Beanspruchungsintensität zunimmt. Das Widerstandsvermögen des Modells ändert sich entsprechend. Folgebelastrungen bedingen nur dann weitere bleibende Verformungen und Steifigkeitsdegradationen, wenn die Intensität der Vorbelastung überschritten wird.

Anhand der in Abb. 4.2c dargestellten Spannungs-Dehnungs-Linie wird die Bedeutung des Prinzips wiederholter Belastungen für Untersuchungen zu strukturellen Änderungen deutlich. Demnach ist es ohne Kenntnis des Modellaufbaus nicht möglich, auf das Ausmaß der Steifigkeitsdegradation zu schließen, wenn die Belastung bis zum Gesamtversagen monoton gesteigert wird. Um Änderungen des Anstieges der Spannungs-Dehnungs-Funktion, die auf Rissbildungsmechanismen beruhen, von sol-

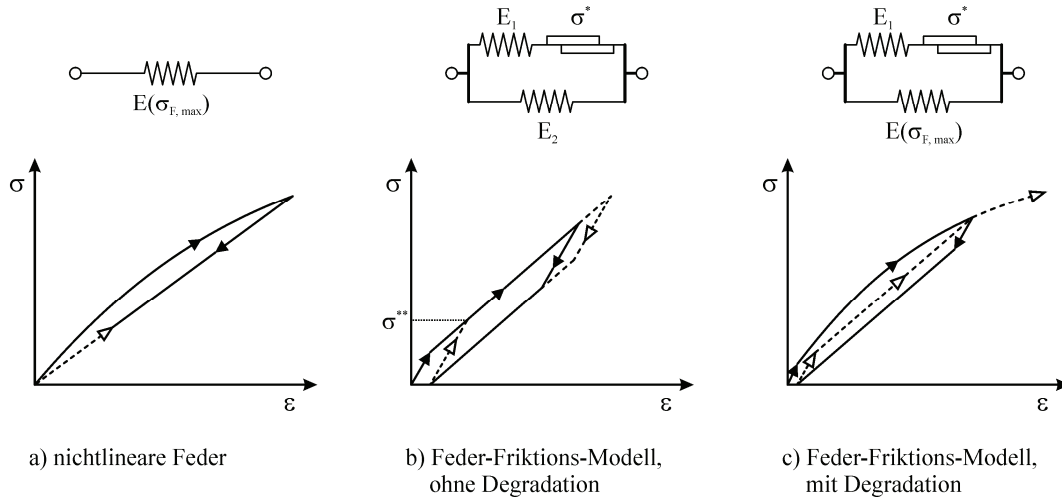


Abb. 4.2: Zeitinvariante mechanische Modelle

chen, die durch plastische Verformungen hervorgerufen werden, zu separieren, muss eine Entlastung des Probekörpers vorgenommen werden. Die elastischen Eigenschaften treten bei Wiederbelastung in Erscheinung.

4.2.2 Feder-Dämpfer-Modelle

Durch Reihen- bzw. Parallelanordnung von Feder und Dämpfer entstehen als elementare Kombinationen das Maxwell-Modell bzw. das Kelvin-Modell.

Das *Maxwell-Modell* veranschaulicht das Verhalten einer relaxierenden zähen Flüssigkeit, Abb. 4.3. Die Gesamtdehngeschwindigkeit des Modells ergibt sich aus der Summe der Dehngeschwindigkeiten von Feder und Dämpfer

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma. \quad (4.4)$$

Im Fall sprunghaft aufgebracht und im Intervall $[t, \tau]$ konstant gehaltener Spannung σ_0 entspricht der zeitabhängige Verformungszuwachs dem des Dämpfers unter den gleichen Bedingungen, Abb. 4.1. Die Gesamtverformung ergibt sich aus der Summe von elastischer Anfangsverformung und der Verformung des Dämpfers

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0}{\eta} (t - \tau). \quad (4.5)$$

Um die Relaxation zu beschreiben, wird von einem konstanten, zum Zeitpunkt τ sprunghaft aufgegebenen Deformationszustand ε_0 ausgegangen. Die vom Element aufgenommene Spannung klingt gemäß

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot E \cdot e^{-\frac{E}{\eta}(t-\tau)} \quad (4.6)$$

zeitabhängig ab, Abb. 4.3. In gleichem Maße verringert sich der Anteil der elastischen Verformung an der Gesamtverformung, der elastische Verformungsanteil strebt asymptotisch dem Wert null entgegen. Die Größe der bei Entlastung verbleibenden Verformung entspricht der momentanen Deformation des Dämpfers, Abb. 4.3.

Liegt keine Vorverformung vor und beginnt die Beanspruchung bei null, ergibt sich die Gesamtdehnung zum Zeitpunkt t bei gleichförmig mit der Geschwindigkeit v erhöhter Spannung aus

$$\varepsilon_t = \frac{v}{E}(t - \tau) + \frac{v}{\eta} \frac{(t - \tau)^2}{2}. \quad (4.7)$$

Der Anstieg des zugehörigen Spannungs-Dehnungs-Diagramms stellt unter anderem eine Funktion der Viskosität und der Belastungsgeschwindigkeit und damit der Versuchsdauer dar, Abb. 4.3. Die Änderung des Anstieges bei zunehmender Beanspruchung geht nicht mit Änderungen des Widerstandsvermögens einher und ist damit nicht als Steifigkeitsdegradation zu interpretieren.

Mit Hilfe dieses Modells lässt sich darlegen, dass zwischen der Gesamtdeformation des Modells und der Beanspruchung der Einzelelemente kein unmittelbarer Zusammenhang besteht. Eine zeitunabhängige, auf Gesamtdehnungen basierende Schwelle, bei der mit dem Ausfall der Feder zu rechnen ist, kann nicht definiert werden.

Das *Kelvin-Modell* beschreibt das Verhalten eines Festkörpers mit elastischer Nachwirkung, Abb. 4.3. Das Stoffgesetz ergibt sich aus Gl. 4.1 und 4.3

$$\sigma_0 = E \cdot \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (4.8)$$

Aufgrund der Parallelanordnung sind die Verformungen in Feder und Dämpfer zu jedem Zeitpunkt gleich groß. Die Größe der Verformungen unter konstanter, zum Zeitpunkt τ sprunghaft aufgebrachtter Spannung richtet sich neben den Konstanten im Stoffgesetz nach der Beanspruchungsdauer und ergibt sich für den Fall, dass keine Vorverformung vorhanden ist, aus

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}(t-\tau)} \right). \quad (4.9)$$

Eine außen aufgebrachte Spannung steht mit den von Feder und Dämpfer entgegenwirkenden Spannungen in Wechselbeziehung. Aufgrund des zeitabhängigen Widerstandes des Dämpfers ergeben sich im Modell Umlagerungen, die dazu führen, dass die Belastung der Feder in dem Maße steigt, wie der Widerstand des Dämpfers nachgibt, Abb. 4.3. Für $t \rightarrow \infty$, wird die gesamte äußere Belastung von der Feder aufgenommen. Nach Entfernen der äußeren Spannung gehen die Verformungen bei hinreichend langer Entlastungsdauer auf null zurück.

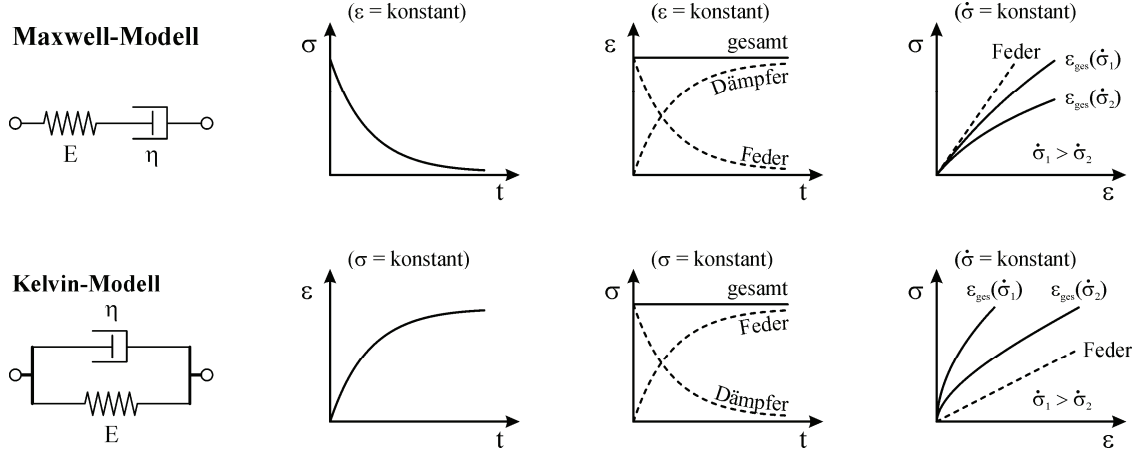


Abb. 4.3: Feder-Dämpfer-Modelle

Für einige Sonderfälle, bei denen konstante Materialparameter vorausgesetzt werden, sind in [Sobotka 1984] analytische Lösungen angegeben. Im praxisrelevanten Fall konstanter Spannungsrate v kann die Beanspruchung der Einzelelemente nicht ohne Weiteres aus der äußeren Spannung abgeleitet werden, Abb. 4.3. Wenn die Belastung bei null beginnt und keine Vorverformung vorliegt, ergibt sich die Gesamtdehnung aus

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E} \left[1 - \frac{\eta v}{E \sigma_t} \left(1 - e^{-\frac{E \sigma_t}{\eta v}} \right) \right] \quad (4.10)$$

mit

$$\sigma_t = v \cdot (t - \tau). \quad (4.11)$$

Damit sind die Funktionsverläufe bei gleichen Eigenschaften an die Belastungsgeschwindigkeit gebunden. Der mit steigendem Beanspruchungsgrad abnehmende Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Funktion ist als scheinbare Steifigkeitsdegradation zu bewerten, da die Beanspruchung keine Änderung des Widerstandsvermögens nach sich zieht.

Soweit eine rissbedingte Steifigkeitsdegradation ausgeschlossen werden kann, strebt die Verformung bei sprunghaft aufgebrachter und anschließend konstant gehaltener Spannung mit abnehmender Geschwindigkeit einem Endwert entgegen, den der Elastizitätsmodul der Feder vorgibt. Wird Rissbildung zugelassen, d. h. eine nichtlineare Feder verwendet, ergeben sich *beanspruchungs- und zeitabhängige Änderungen der Elastizität*, Abb. 4.4a. Solche zeitabhängigen Änderungen der elastischen Eigenschaften, die an einem separat betrachteten Federmodell definitionsgemäß nicht auftreten können, sind ausschließlich durch eine entsprechende Kombination von Feder und Dämpfer möglich.

Die resultierenden Verformungen streben nur dann einem stabilen Zustand entgegen, wenn die außen aufgebrachte Spannung kleiner als der Maximalwiderstand der Feder ist. Bei höherer Spannung tritt

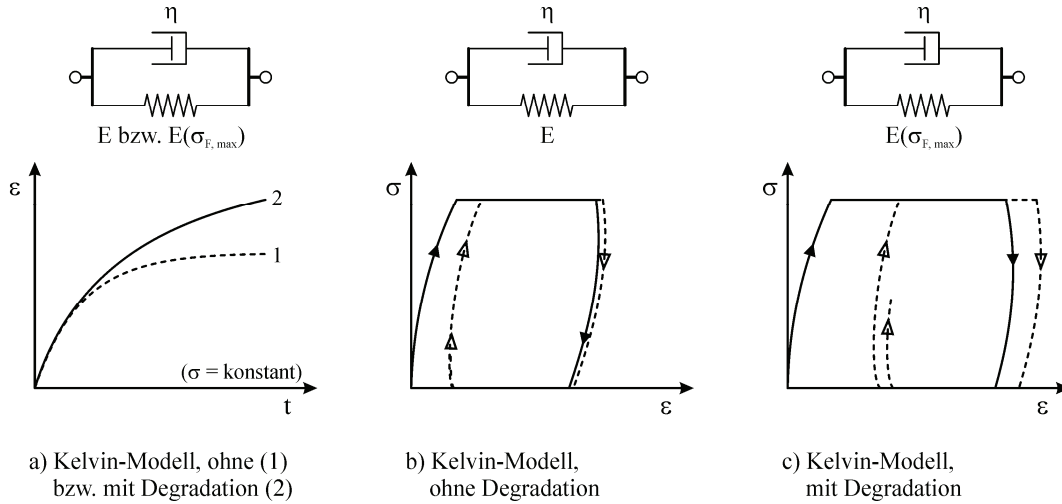


Abb. 4.4: Dehnungszuwachs bei konstanter Spannung und Spannungs-Dehnungs-Linien bei zyklisch eingetragener Belastung für verschiedene Kelvin-Modelle ohne bzw. mit Steifigkeitsdegradation

nach entsprechender Haltezeit das Versagen der Feder ein. In diesem Fall wird die gesamte Beanspruchung vom Dämpfer aufgenommen, irreversible zeitabhängige Verformungen sind die Folge.

In Abb. 4.4b und c sind die Spannungs-Dehnungs-Funktionen zweier Modelle dargestellt, die wiederholten Belastungen ausgesetzt wurden. Im belasteten und entlasteten Zustand wurde die Spannung konstant gehalten. Soweit konstante Materialeigenschaften vorausgesetzt werden können, genügt es für die Berechnung, die Lastgeschichte in Abschnitte konstanter Spannungsraten v zu unterteilen und die Verformungen nach Gl. 4.12 zu ermitteln [Sobotka 1984].

Wird eine Steifigkeitsdegradation zugelassen (Abb. 4.4c), können die Verformungen numerisch durch eine Diskretisierung der Lastgeschichte in Intervalle $[t, \tau]$ nach Gl. 4.13 berechnet werden. In diesen Intervallen liegen konstante Spannungen $\sigma_{t, \tau}$ und Materialeigenschaften $E_{t, \tau}, \eta_{t, \tau}$ vor.

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E} - \frac{\sigma_\tau}{E} \cdot e^{-\frac{E}{\eta}(t-\tau)} - \frac{v \cdot \eta}{E^2} \left[1 - e^{-\frac{E}{\eta}(t-\tau)} \right] + \varepsilon_\tau \cdot e^{-\frac{E}{\eta}(t-\tau)} \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_{t,\tau}}{E_{t,\tau}} - \frac{\sigma_{t,\tau}}{E_{t,\tau}} \cdot e^{-\frac{E_{t,\tau}}{\eta_{t,\tau}}(t-\tau)} + \varepsilon_\tau \cdot e^{-\frac{E_{t,\tau}}{\eta_{t,\tau}}(t-\tau)} \quad (4.13)$$

Aufgrund der elastischen Nachwirkung erfolgt die Wiederbelastung am deformierten Modell. Entsprechende Modifikationen ergeben sich bei den Anstiegen der Spannungs-Dehnungs-Funktionen für Erstbelastung und Lastwiederholung. Abb. 4.4b lässt erkennen, dass diese Änderungen bei weiteren Lastwiederholungen in den Hintergrund treten, wenn keine Degradation der Steifigkeit erfolgt.

Für die in Abb. 4.4c dargestellte Spannungs-Dehnungs-Funktion wurde ein Modell mit nichtlinearer Feder verwendet. Eine weitgehend stabile Hysterese ist bei diesem Modell nur im Fall moderater Spannungen möglich. Hohe Spannungen gehen mit entsprechenden Steifigkeitsdegradationen und damit höheren Kriechgeschwindigkeiten einher. Der Anteil verzögert elastischer Verformungen ver-

größert sich entsprechend. Wird in einem Belastungszyklus durch beanspruchungs- und zeitabhängige Umlagerungen die Maximalspannung der Feder erreicht, tritt das Versagen der Feder ein. Das weitere Verhalten wird von den Eigenschaften des Dämpfers bestimmt.

Bei Normalbeton treten beanspruchungsdauerabhängige viskose und elastische Eigenschaften auf. Kelvin-Modelle haben folglich für die Modellierung des Betonverhaltens eine besondere Bedeutung. Änderungen der elastischen Eigenschaften zeichnen sich bei mehrfach wiederholter Belastung durch eine zyklenspezifische Abnahme des Anstieges der Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus.

4.2.3 Kombiniertes Modell für einachsige Untersuchungen

Bei der Abbildung des Tragverhaltens mit Hilfe mechanischer Modelle können unterschiedliche Aspekte im Vordergrund stehen. Entsprechend vielfältig sind die für Normalbeton vorgeschlagenen Modellkombinationen und ermittelten Parameter [z. B. Shen 1992, Pölling 2000, Bockhold & Stangenberg 2004, Bockhold 2005]. Ein Modell für kunststoffmodifizierten Beton wurde von Heidolf (2007) entwickelt, wobei die im Vergleich zu Normalbeton wesentlich größeren Kriechverformungen und die Wirkung der Nacherhärtung berücksichtigt wurden.

Die beanspruchungsabhängigen Längsstauchungen des Betons setzen sich aus zeitvarianten und zeitinvarianten Verformungsanteilen zusammen, die grundsätzlich überlagert in Erscheinung treten. Bei der Modellierung lässt sich dies durch eine entsprechende Anordnung von Elementen bzw. Elementgruppen, denen die zuvor näher erläuterten Eigenschaften zugeordnet sind, berücksichtigen.

Mit zunehmender Anzahl der verwendeten Elemente bzw. Elementgruppen kann der erreichbare Genauigkeitsgrad erhöht bzw. durch die Art der Elemente Besonderheiten des Materialverhaltens herausgestellt werden. Die Anpassung der Parameter erfolgt im Allgemeinen mit fehlerminimierenden Verfahren auf der Basis von Versuchsdaten, sodass sich im Berechnungsergebnis die Materialspezifik und die Art der Versuchsdurchführung widerspiegeln.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit stehen Untersuchungen zum Einfluss der Lastgeschichte auf das Tragverhalten von Normalbeton und Porenbeton im Vordergrund. Mit Hilfe von Modellüberlegungen sollen allgemeine Phänomene bezüglich des Tragverhaltens gedeutet werden, die bei verschiedenen Betonarten zu beobachten sind. Es wird die in Abb. 4.5 dargestellte, grundsätzliche Anordnung der Elemente vorgeschlagen. Das Tragverhalten der Teilsysteme wurde vorangehend erörtert.

Die im vorgeschlagenen Modell enthaltenen Feder-Dämpfer-Teilmodelle geben das beanspruchungs- und zeitabhängige Verformungsverhalten wieder, Abb. 4.5. Die Degradation der Steifigkeit richtet sich nach dem Beanspruchungsgrad der Federelemente, der am Gesamtmodell ohne Kenntnis der Lastgeschichte nicht unmittelbar aus der Gesamtverformung bzw. der äußeren Spannung abgeleitet werden kann. Der Ausfall einzelner Federn bedingt viskose Verformungen, deren Größe mit der Zeit zunimmt.

Mit den Feder-Frictions-Teilmodellen werden beanspruchungsabhängige zeitinvariante Eigenschaften berücksichtigt. Änderungen der elastischen Eigenschaften bewirken bleibende Verformungen, deren Größe sich nach der Beanspruchungsintensität richtet. Der Ausfall einer einzelnen nichtlinearen Feder leitet das Gesamtversagen des Systems ein.

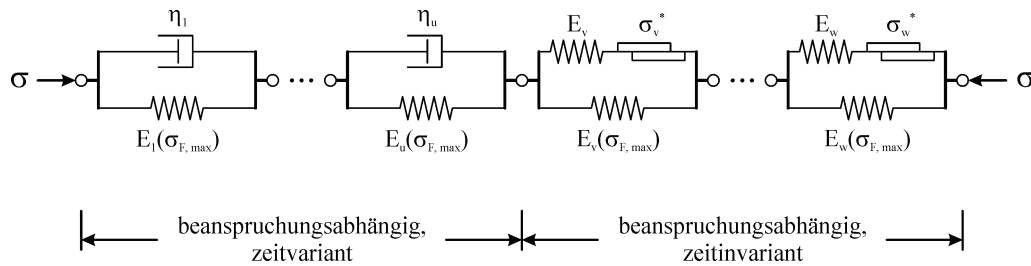


Abb. 4.5: Kombiniertes Modell

Die Beurteilung des Tragvermögens von Beton setzt die Berücksichtigung der Lastgeschichte voraus, da sich diese maßgeblich auf den makroskopischen Spannungs- und Gesamtdehnungswert auswirkt. Das Widerstandsvermögen bei großer Beanspruchungsdauer wird wesentlich von den Eigenschaften der Federelemente geprägt. Deshalb ist die Kenntnis der elastischen Eigenschaften für die Beurteilung des Langzeittragvermögens von grundlegender Bedeutung.

Häufig werden die Festigkeits- und Formänderungsparameter mit Versuchen ermittelt, bei denen die Beanspruchung monoton gesteigert wird. Eine Separierung der elastischen Formänderungsanteile aus den gewonnenen Spannungs-Dehnungs-Linien ist in diesem Fall nicht möglich, da diese grundsätzlich von inelastischen Effekten überlagert in Erscheinung treten und der genaue Modellaufbau und die weiteren Elementeeigenschaften materialabhängig in weiten Grenzen variieren können und somit unbekannt sind.

Eine Einschätzung der elastischen Verhältnisse kann anhand von Spannungs-Dehnungs-Informationen vorgenommen werden, die durch Versuche mit wiederholter Belastung gewonnen werden. Infolge Vorbelastung wird ein Teil der inelastischen Formänderungsanteile vorweggenommen, sodass bei Lastwiederholung die elastischen Eigenschaften in den Vordergrund treten. Entsprechend den vorangegangenen Modellbetrachtungen sind kritische Beanspruchungszustände durch eine progressiv voranschreitende Degradation der Steifigkeit gekennzeichnet, die sich in einem zyklenspezifisch abnehmenden Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Funktion äußert.

4.3 Ebene und räumliche Modellvorstellungen

Mit Hilfe der zuvor beschriebenen Modelle konnte eine Vorstellung über die bei einachsiger Beanspruchung in Lastrichtung zu beobachtenden Phänomene erarbeitet werden. Mit derartigen Modellen können die bemessungsrelevanten Trageigenschaften von Beton im Allgemeinen hinreichend genau beschrieben werden, da gewöhnlich das Spannungs-Längsdehnungs-Verhalten im Vordergrund steht.

Aufgrund der Längsrissbildung, die sich maßgeblich auf das Querdehnverhalten auswirkt, kommt den Querverformungen bei Beton eine besondere Bedeutung zu. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass auch in Querrichtung elastische und inelastische Verformungen auftreten. Vorangegangene Feststellungen, die sich auf die Bedeutung einzelner Elemente für das Tragverhalten in Lastrichtung beziehen, lassen sich auf ebene und räumliche Probleme übertragen.

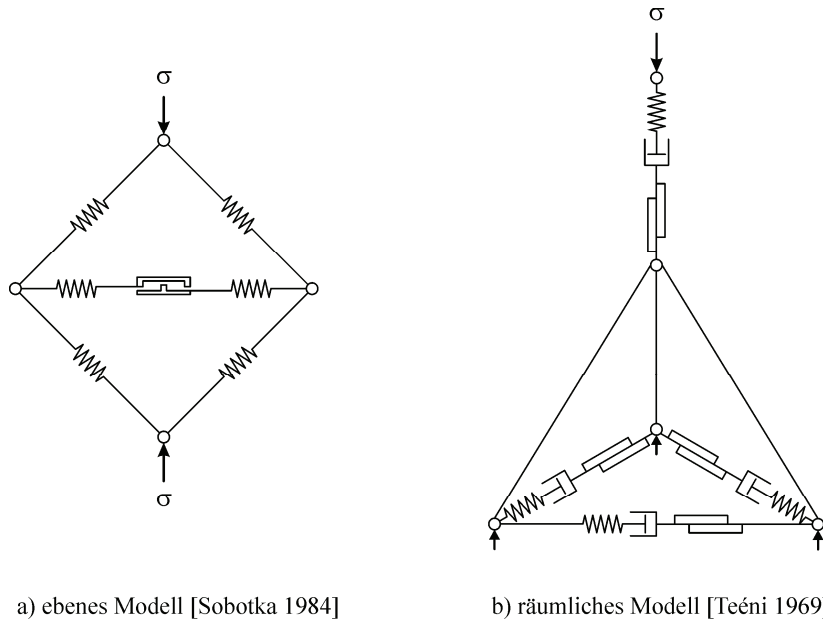


Abb. 4.6: Ebene und räumliche Elementanordnung

Vorschläge zur Modellbildung wurden von Teéni (1969) und Sobotka (1984) veröffentlicht, Abb. 4.6. Anhand dieser Modelle lassen sich grundlegende Zusammenhänge in Bezug auf den durch einachsige Beanspruchung herbeigeführten mehrachsigen Deformationszustand und die daraus resultierenden Prozesse erläutern. Entsprechend den zu modellierenden Eigenschaften können analog zum einachsigen Fall weitere Elemente ergänzt sowie die geometrische Anordnung verändert werden.

Eine von außen aufgebrachte Druckbelastung führt bei den in Abb. 4.6 dargestellten Modellen zu einer Zugbelastung und Dehnung in Querrichtung. Soweit für das Modell in Querrichtung nichtlineare Federelemente verwendet werden, kann entsprechend der Beanspruchungsintensität der horizontal angeordneten Federn eine Degradation der Steifigkeit in Querrichtung auftreten. Dies hat wie beim einachsigen Pendant eine entsprechende Verformungszunahme zur Folge.

Aufgrund der Anordnung der Elemente ergibt sich beim ebenen und räumlichen Modell zusätzlich ein Verformungszuwachs in Längsrichtung, wenngleich sich die Eigenschaften der längs ausgerichteten Elemente nicht verändert haben müssen, Abb. 4.6. Daraus lässt sich der Einfluss der Längsrissbildung auf das Gesamtdeformationsverhalten von Beton unmittelbar ableiten.

Bei Normalbeton bewirkt die Längsrissbildung eine Steifigkeitsdegradation in Quer- und Längsrichtung, ein Ansteigen der Querdehnzahl sowie, in Versagensnähe, eine progressive Aufweitung des Gefüges in Querrichtung, die als relative Volumenvergrößerung wahrgenommen wird. Für die Untersuchungen zum Einfluss struktureller Änderungen auf das Tragverhalten von Beton ist folglich die Einbeziehung der Querverformungen von zentraler Bedeutung.

4.4 Zusammenfassende Bemerkungen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss struktureller Änderungen auf das Tragverhalten von Porenbeton untersucht, wobei die Bewertung des Langzeittragverhaltens im Vordergrund steht. Für die Interpretation der Versuchsergebnisse stellen die vorangegangenen Modellbetrachtungen, mit denen die Bedeutung einzelner Phänomene für das Tragverhalten dargelegt wurde, die Grundlage dar.

Folgende Sachverhalte konnten mit Hilfe der mechanischen Modelle herausgearbeitet werden:

- Bei der Beurteilung des Tragverhaltens auf der Basis makroskopischer Spannungen bzw. Dehnungen muss die Lastgeschichte berücksichtigt werden. Die Bruchspannung und die Bruchstauchung hängen ebenfalls von der Lastgeschichte ab.
- Der Materialwiderstand und die Steifigkeit sind umso größer, je höher die Beanspruchungsgeschwindigkeit ist.
- Bei sehr kleiner Beanspruchungsgeschwindigkeit bzw. bei ruhender Belastung wird das Widerstandsvermögen maßgeblich durch die Federelemente und damit die elastischen Eigenschaften bestimmt. Der Minimalwert des Bruchwiderstandes, der als *Dauerstandfestigkeit* aufgefasst wird, ist wesentlich durch den Widerstand der Federn und somit die *elastischen Eigenschaften* des Materials vorgegeben.
- Durch eine Vorwegnahme irreversibler Verformungen sowie kriechbedingter, reversibler Effekte bei Erstbelastung kann die Spannungs-Dehnungs-Funktion bei Lastwiederholung einen größeren Anstieg als bei Erstbelastung aufweisen, was im Hinblick auf die elastischen Eigenschaften als scheinbare Steifigkeitserhöhung anzusehen ist.
- Beanspruchungsbedingte Entfestigungen der Struktur gehen mit Änderungen der Steifigkeit einher, die bei wiederkehrender Belastung erkannt werden können.
- Die Gesamtsteifigkeit des Materials ist durch das Verformungsverhalten längs und quer zur Beanspruchungsrichtung charakterisiert. Für die Bewertung des Tragverhaltens von Normalbeton und Porenbeton ist deshalb die Berücksichtigung der Verformungen in Längs- und Querrichtung zweckmäßig.

Kapitel 5

Experimentelle Untersuchungen und Versuchsauswertung

Bei der Auswertung der experimentellen Untersuchungen zum Tragverhalten von Porenbeton sollen die zuvor diskutierten Zusammenhänge zwischen Beanspruchungs-Zeit-Regime und Materialverhalten einbezogen werden.

Im Vordergrund stehen Untersuchungen zur Dauerstandfestigkeit von Porenbeton, die im Rahmen der Arbeit als maßgeblicher Parameter zur Beurteilung des Materialwiderstandes angesehen wird. Anhand von Langzeitversuchen und zusätzlich durchgeführten Kurzzeitversuchen wird das Materialverhalten von Porenbeton hinsichtlich charakteristischer Phasen des Tragverhaltens analysiert. Die Grundlage hierfür stellen Messwerte zu Kräften und Verformungen dar, die unter Einbeziehung der dreidimensionalen Ansätze der Spannungs- und Deformationstheorie ausgewertet werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf das Verhalten weiterer Betonarten überprüft.

5.1 Charakteristik der Versuche

Die Versuche erfolgten in einem klimatisierten Raum bei 20 °C und 63 % relativer Luftfeuchte. Während der Versuche wurden die Probekörper mit Hilfe einer Prüfmaschine einachsigen, zentrischen Druckbeanspruchungen unterzogen, die senkrecht zur Treibrichtung eingeleitet wurden. Die Längs- und Querverformungen wurden mit Dehnungsmessstreifen erfasst. Zu den Verformungswerten wurden die Kraft und die Zeit aufgezeichnet. Zusätzlich wurden Schwindmessungen durchgeführt.

5.1.1 Probekörper, Versuchsaufbau, Messtechnik

Für alle Untersuchungen kamen als Probekörper Porenbetonzylinder zum Einsatz, die nach der Autoklavierung aus handelsüblichen unbewehrten Wandelementen der laufenden Produktion gefertigt wurden, Tab. 5.1. Insgesamt wurden drei Serien, von unterschiedlichen Porenbetonwerken hergestellt, untersucht.

Tab. 5.1: Charakteristik der Probekörper

Serie	1	2	3
Hersteller	Hebel	Ytong	Ytong
Werk	Emmering	Schrobenhausen	Brück
Festigkeitsklasse	4.4	4.4	2
Rohdichteklasse	0,6	0,6	0,4
Geometrie	Zylinder, d = 150 mm, l = 400 mm		
Belastungsrichtung	senkrecht zur Treibrichtung		
Treibhöhe	unterer Teil		

Alle Probekörper wurden aus dem unteren Teil der Treibhöhe entnommen, Tafel 5.1a. Hierfür wurden zunächst Prismen aus den Elementen gesägt und danach auf einer Drehbank bearbeitet. Anschließend wurden die Endflächen der Zylinder abgesägt. Alle Bearbeitungsschritte erfolgten bei Herstellfeuchte, ohne Zugabe von Wasser.

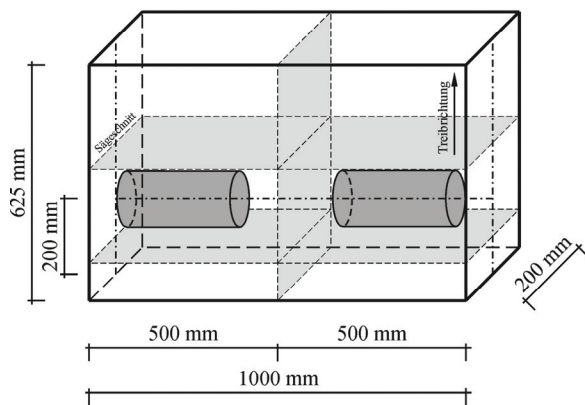
Die Probekörper wurden an der Bauhaus-Universität Weimar im Klimaraum der Versuchstechnischen Einrichtung (VTE) eingelagert. Bis zum Beginn der Versuche wurde die Masse der Probekörper in zeitlichen Abständen bestimmt. Nachdem keine signifikante Änderung der Probekörpermasse mehr feststellbar war, wurde mit den Versuchen begonnen. Eine Vorkonditionierung der Probekörper im Trockenschrank, wie nach DIN EN 1352 (1997) zulässig, wurde nicht vorgenommen. Im Anschluss an die Versuche wurden die Bruchstücke bei 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet und der massebezogene Feuchtegehalt entsprechend DIN EN 1353 (1997) sowie die Trockenrohddichte nach DIN EN 678 (1994) ermittelt.

Für die Versuche stand eine servohydraulische Prüfanlage (*Werkstoffprüfmaschinen Leipzig*), die für statische Belastungen bis 630 kN konzipiert ist, zur Verfügung, Tafel 5.1c. Die obere Druckplatte ist über eine Kalotte gelenkig gelagert. Auf Lasteinleitungshilfen an den Druckplatten, z. B. Weichfaserplatten, wurde verzichtet. Abgesehen von zwei Versuchen mit Wegregelung wurde die Beanspruchung über die Kraft geregelt. Die Messung der Kraft erfolgte durch die in der Maschine installierte Kraftmessdose (630 kN, Genauigkeitsklasse 0,02), die vor Versuchsbeginn kalibriert wurde.

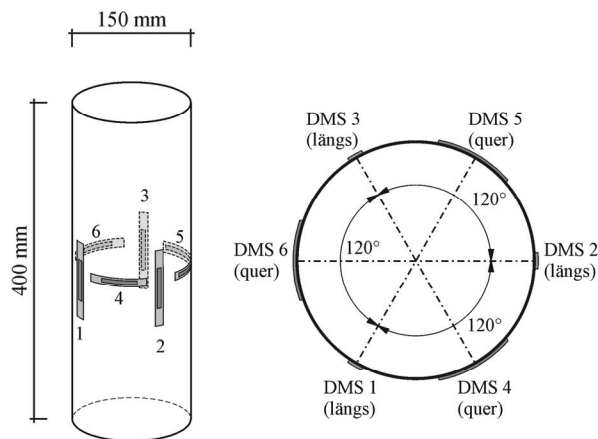
Die Längs- und Querverformungen wurden mit jeweils drei um 120° versetzten, 50 mm langen Dehnungsmessstreifen (DMS) erfasst, die in halber Probekörperhöhe appliziert wurden, Tafel 5.1b. Zum Applizieren der Dehnungsmessstreifen waren gesonderte Bearbeitungsschritte erforderlich. Zunächst wurden die Probekörper an den entsprechenden Stellen grundiert, um die Saugfähigkeit der Oberfläche zu verringern. Anschließend wurden die Poren an diesen Stellen verspachtelt und die Oberfläche geschliffen. Im Anschluss konnten die Dehnungsmessstreifen aufgeklebt werden.

Während der Versuche wurden alle Messstellen für Kraft und Verformung unter Verwendung einer *DMCplus* bzw. *Spider8* (Datenerfassungssysteme) zeitgleich abgetastet. Der Messtakt wurde den Erfordernissen angepasst, er variierte zwischen 150/s und 4/d.

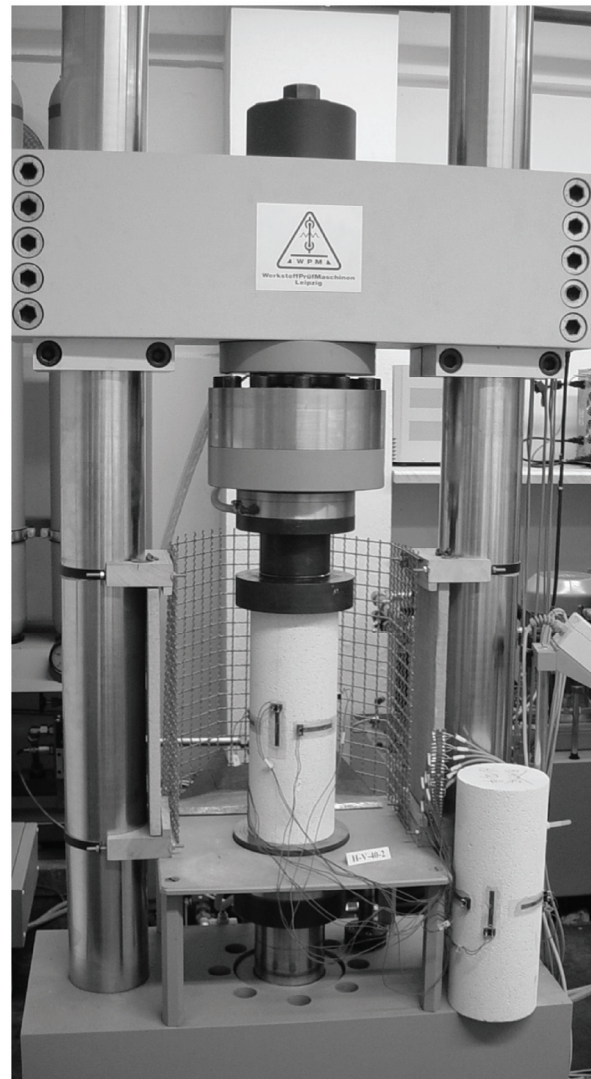
Tafel 5.1: Vorbereitung der Probekörper und Versuchsaufbau



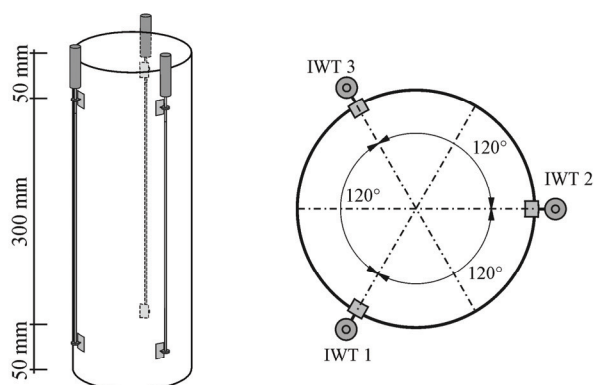
a) Entnahmeschema



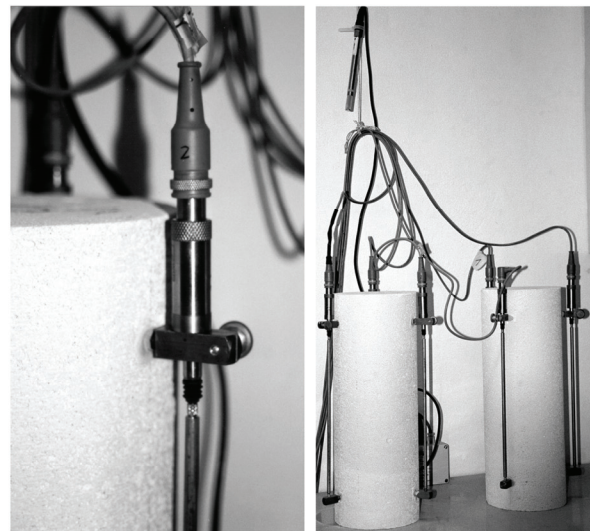
b) Anordnung der Dehnmessstreifen



c) Versuchsstand mit eingebautem Probekörper und Kompensationskörper



d) Anordnung der induktiven Wegaufnehmer für die Schwindmessungen, Versuchsaufbau



Unter Verwendung eines zusätzlichen, unbelasteten Probekörpers wurden parallel Temperatur- und Schwinddehnungen erfasst. Zur Kompensation dieser Einflüsse erfolgte die Schaltung der Verformungsmessstellen als *Wheatstonesche Halbbrücke*.

Mit der Einlagerung der Probekörper in den Klimaraum wurde ferner mit Messungen zur Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur begonnen, Messtakt 1/h. Zeitgleich wurden an zwei Probekörpern die Schwindverformungen anhand der Längenänderungen der Probekörper erfasst. Die Messungen wurden mit jeweils drei um 120° versetzten induktiven Wegaufnehmern (1 mm) im Stundentakt durchgeführt. Zur Arretierung der Wegaufnehmer wurden Löcher in die Probekörper gebohrt und mit Kunstharz Muffen eingeklebt, Tafel 5.1d.

5.1.2 Versuchsprogramm

Für die Versuche wurden unterschiedliche Lastregime gewählt:

- monoton gesteigerte Beanspruchung bis zum Versagen,
- monoton gesteigerte Beanspruchung bis zum vorgesehenen Lastniveau mit anschließend konstant gehaltener Belastung,
- niederzyklisch gesteigerte Belastung.

Die Versuche mit monoton gesteigerter Beanspruchung dienten zur Ermittlung der Kenngrößen Kurzzeitdruckfestigkeit und Dauerstandfestigkeit. Im Rahmen der Versuche mit quasistatischer, niederzyklisch gesteigerter Belastung wurde der Einfluss der beanspruchungsbedingten Strukturänderungen auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten untersucht.

5.1.2.1 Standardversuche zur Bestimmung der Kurzzeitdruckfestigkeit

Den Ausgangspunkt der Untersuchungen bildet die Kurzzeitfestigkeit, die bei standardisierten Versuchsbedingungen unter zentrischer Druckbelastung mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit ermittelt wurde. Um den Einfluss von Festigkeitsstreuungen zu erfassen, wurde die Kurzzeitdruckfestigkeit an 10 bzw. 6 Probekörpern je Charge untersucht, Tabelle 5.2. Der Mittelwert der somit festgestellten Bruchspannungen wird bei den nachfolgenden Betrachtungen als Bezugswert herangezogen und als *Kurzzeitdruckfestigkeit* bezeichnet.

Tab. 5.2: Probekörperanzahl und Geschwindigkeit

Serie	1	2	3
Festigkeitsklasse	4.4	4.4	2
Probekörperanzahl	10	10	6
Belastungsgeschwindigkeit [N/mm ² /s]	0,015	0,015	0,01

5.1.2.2 Weitere Versuche mit monoton gesteigerter Beanspruchung

Um den Einfluss der Beanspruchungsgeschichte auf strukturelle Änderungen zu untersuchen, wurden weitere Versuche unter Modifikation des Lasteintrags durchgeführt. Abweichend vom Standardversuch wurden zusätzlich folgende Belastungsgeschwindigkeiten gewählt:

- Serie 1: 0,001 N/mm²/s, 0,10 N/mm²/s, 10,0 N/mm²/s,
- Serie 3: 1,0 N/mm²/s.

Ergänzend zu den Versuchen mit Kraftregelung wurden zwei Probekörper der Serie 1 verformungsregelt zu Bruch gefahren. Die Verformungsraten betrugen 0,0002 bzw. 0,006 mm/m je Sekunde.

5.1.2.3 Versuche mit ruhender Belastung

Bei den Versuchen mit ruhender Belastung erfolgte die Einleitung der Druckkraft bis zu den festgelegten Beanspruchungsgraden mit derselben Geschwindigkeit wie bei den Versuchen zur Ermittlung der Kurzzeitdruckfestigkeit, d. h. bei den Serien 1 und 2 mit 0,015 N/mm² je Sekunde und bei Serie 3 mit 0,01 N/mm² je Sekunde. Mit Erreichen der entsprechenden Beanspruchungsintensität wurde die Kraft bis zum Eintreten des Probekörperversagens konstant gehalten. Bezogen auf die Mischungsspezifischen Kurzzeitdruckfestigkeiten wurden Beanspruchungsgrade zwischen 80 und 95 % realisiert. Die Probekörper, bei denen die gewählte Last in entsprechendem zeitlichen Rahmen nicht zum Versagen führte, wurden entlastet und anschließend für weitere Versuche verwendet.

5.1.2.4 Versuche mit niederzyklisch gesteigerter Belastung

Bei diesen Versuchen wurde die Druckbeanspruchung schrittweise in Laststufen bis zum Versagen gesteigert. Von Laststufe zu Laststufe wurde die Beanspruchung um einen festen Betrag erhöht, je nach Probekörper um 2 bis 5 % der Kurzzeitdruckfestigkeit. Zu jeder Laststufe gehörten ein bzw. drei Lastzyklen. In jedem Zyklus wurde die Kraft nach Belastung und nach Entlastung auf ein Grundlastniveau von 1 kN konstant gehalten.

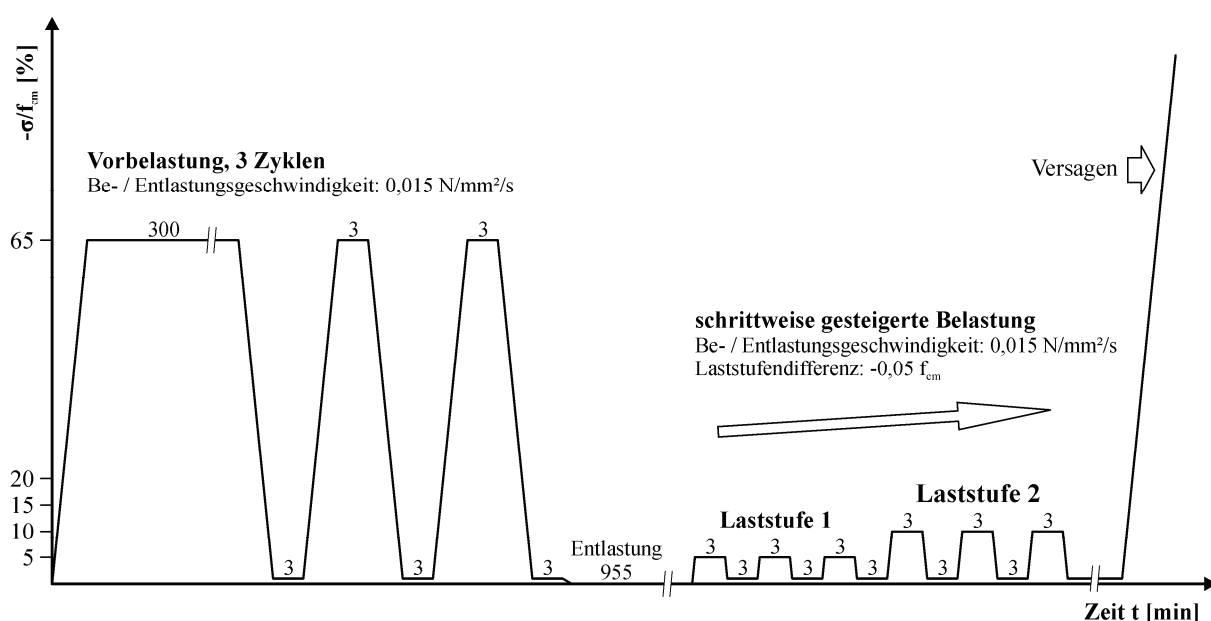


Abb. 5.1: Belastungsregime für niederzyklisch erhöhte Druckbelastung (Probekörper H V65-01)

Vor Beginn dieses regelmäßigen Ablaufes wurden einige Probekörper der Serie 1 höheren Beanspruchungen unterzogen. Diese Beanspruchungen werden nachfolgend als *Vorbelastung* bezeichnet, Abb. 5.1.

In Tabelle 5.3 sind die gewählten Belastungs-Zeit-Funktionen in Kurzform dargestellt. Nähere Angaben zu jedem einzelnen Probekörper befinden sich im Anhang.

Tab. 5.3: Lastregime, Kurzübersicht

Probekörper	Vorbelastung			niederzyklisch gesteigerte Druckbelastung			
	Intensität	Zykluszahl	Gesamtdauer	Laststufendifferenz	Zykluszahl je Laststufe	Haltezeit je Zyklus	
	$-\sigma/f_{cm}$ [%]	[-]	t [min]	$-\sigma/f_{cm}$ [%]	[-]	Volllast t [min]	Grundlast t [min]
<i>Serie 1</i>							
H RS-01	-	-	-	5	3	3	3
H V40-01	40	3	306	5	3	3	3
H V65-01	65	3	306	5	3	3	3
H V85-01	85	3	31450	5	3	3	3
H 151	50	1	120	5	1	30	60
H 155	70	1	120	5	1	30	60
H 154	80	2	136	5	1	30	60
<i>Serie 3</i>							
314	-	-	-	5	3	3	3
316	-	-	-	2	3	3	3
306	-	-	-	3	1	10	10

5.2 Versuchsergebnisse

Die Auswertung der Versuchsdaten bezieht sich vordergründig auf die Festigkeits- und Formänderungsparameter sowie das Bruchverhalten. Analysiert werden Spannungen, Standzeiten, Längsstauchungen, Querdehnungen, Querdehnzahlen, Elastizitätsmoduln, Volumenänderungen, Kompressionsmoduln, Gestaltänderungen, Gleitmoduln sowie verformungsspezifische Energieanteile. Die Ergebnisse werden nachfolgend in Form von Übersichten dargestellt. Im Anhang sind diese Zusammenhänge sowie Einzelwerte und ergänzende Informationen zur Versuchsdurchführung für jeden Probekörper separat aufbereitet.

Zusätzlich werden Auswertungen hinsichtlich der Schwinddehnungen und der Werte für den massebezogenen Feuchtegehalt und die Trockenrohdichte vorgenommen, wobei diese lediglich orientierenden Charakter haben.

5.2.1 Hinweise zur Auswertung, Begriffsbestimmungen

Im Rahmen der Versuche wurden die Probekörper einachsigen zentrischen Druckbelastungen ausgesetzt und die äußere Kraft sowie die Längs- und Querverformungen zeitgleich messtechnisch erfasst. Mit Hilfe dieser Messwerte wird auf den inneren, als homogen und isotrop aufgefassten Spannungs- und Deformationszustand geschlossen. Der Porenbeton wird als Kontinuum angesehen. Lokale Effekte, wie örtlich erhöhte Spannungen oder rissbedingte Gefügetrennungen, werden bei dieser Betrachtungsweise vernachlässigt. Es wird von quasistatischen Beanspruchungen ausgegangen, sodass Trägheitseffekte vernachlässigt werden können.

Die Auswertungen zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten erfolgen unter mehreren Aspekten. Zunächst werden die im Versuch gemessenen Längs- und Querverformungen separat sowie das Verhältnis von Querdehnung zu Längsstauchung in Abhängigkeit von der Spannung bzw. der Beanspruchungsintensität analysiert. Weiterhin werden die Messdaten unter Einbeziehung der dreidimensionalen Ansätze der Spannungs- und Deformationstheorie hinsichtlich des *sphärischen* und des *deviatorischen* Anteils des Spannungs- und Dehnungszustandes ausgewertet. In Zusammenhang mit den sphärischen und deviatorischen Spannungsanteilen werden *Volumenänderungen* bzw. *Gestaltänderungen* ausgewiesen.

Den Ausgangspunkt zur Berechnung einzelner Spannungsanteile bildet die *Normalspannung* σ , als Quotient von außen angreifender Kraft und Querschnittsfläche der Probekörper, die vor Beginn der Versuche bestimmt wurde. Aus der Normalspannung werden die *sphärische* und die *deviatorische* Spannungskomponente σ_H bzw. σ_D berechnet. Da in einachsigen Versuchen lediglich eine Hauptnormalspannung $\sigma = \sigma_3$ wirkt, vereinfachen sich die Gleichungen 2.21 und 2.22 wie folgt:

$$\sigma_H = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma, \quad (5.1)$$

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot |\sigma|. \quad (5.2)$$

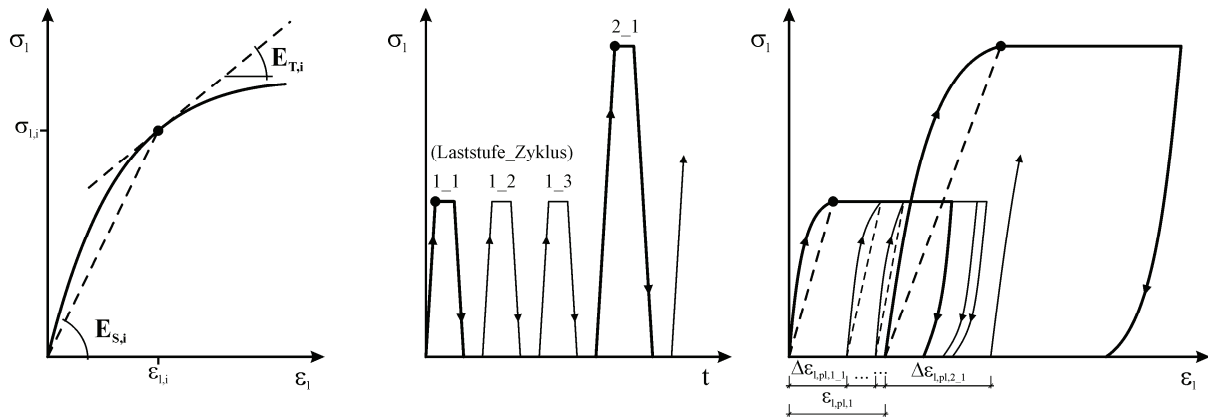
Analog zum Spannungszustand wird der räumliche Verformungszustand in einen *sphärischen* und einen *deviatorischen* Anteil zerlegt. Unter Anwendung von Gl. 2.40 und 2.41 werden aus der Längsdehnung $\varepsilon_l = \varepsilon_3$ und der Querdehnung $\varepsilon_q = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$ die sphärischen und deviatorischen Verformungsanteile ε_H bzw. ε_D berechnet:

$$\varepsilon_H = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\varepsilon_l + 2 \cdot \varepsilon_q), \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_D = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot |\varepsilon_l - \varepsilon_q|. \quad (5.4)$$

Diese Spannungs- und Verformungswerte sind Zylinderkoordinaten, sogenannte *Haigh-Westergaard-Koordinaten*. Durch Modifikation der Koeffizienten lassen sich weitere Invarianten berechnen, wie z. B. die Oktaederspannungen oder die hydrostatische Spannung und zugeordnete Verformungen, vgl. Kapitel 2. Die Dehnung nach Gl. 5.3 ist ein Maß für die *Volumenänderung*, sie stellt ein Vielfaches der Volumendehnung θ dar, siehe Gl. 2.40.

Mit Hilfe der Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge werden die zugeordneten Steifigkeiten ermittelt, die die Anstiege der Funktionen widerspiegeln. Aus der Normalspannungs-Längsdehnungs-Funktion wird der *Elastizitätsmodul* und aus den sphärischen und deviatorischen Spannungs-Dehnungs-



a) Tangenten- bzw. Sekantenmodul b) Lastregime und Strukturantwort bei niederzyklisch gesteigerter Belastung

Abb. 5.2: Prinzipdarstellung zur Spannungs-Dehnungs-Analyse

Zusammenhängen der *Kompressionsmodul* bzw. der *Gleitmodul* berechnet, wobei nach Tangenten- und Sekantensteifigkeiten unterschieden wird. Die Anstiege, die in Abb. 5.2a am Beispiel des Elastizitätsmoduls für den Zeitpunkt i dargestellt sind, werden entlang der Belastungsäste, d. h. in den Phasen steigender Beanspruchung, kontinuierlich untersucht.

Im Rahmen der Auswertungen zu den Versuchen mit überwiegend ruhender Belastung, den *Zeitstandversuchen*, steht die Analyse des Zeitstandtragverhaltens, d. h. sowohl der Zeitstand- und Dauerstandfestigkeit als auch der Entwicklung der Verformungsparameter in den Lasthaltephasen im Vordergrund. In diesem Zusammenhang wird unter *Standzeit* die Zeitspanne verstanden, in der die Pressenkraft konstant gehalten wurde. Die für die Lastaufbringung erforderliche Zeitdauer, die je nach Lastregime etwa 4 bis 7 Minuten beträgt, wird dabei nicht berücksichtigt.

Bei den Versuchen mit *zyklisch gesteigerter Belastung* ergeben sich bis zum Versagen je nach Lastregime bis zu 60 Be- und Entlastungsäste sowie Phasen konstanter Spannung. Ferner bieten sich aus diesem Belastungsprinzip zusätzliche Möglichkeiten der Messdatenauswertung. Um die Übersichtlichkeit der Darstellungen zu gewährleisten, können einzelne Zusammenhänge nicht in jedem Fall kontinuierlich, d. h. als Funktionsverläufe angegeben werden.

In Übersichten, in denen die Strukturreaktionen mehrerer Probekörper gegenüberstellend angegeben sind, soll der Einfluss der Lastgeschichte auf die Strukturreaktionen hervorgehoben werden. Hierfür werden im Allgemeinen die Messdaten, die jeweils im Primärzyklus bei Erreichen der Maximallast erfasst worden sind, herangezogen, vgl. Punkte in Abb. 5.2b. Eine Ausnahme bilden die Darstellungen zu den plastischen Verformungsanteilen und zur dissipierten Formänderungsenergie. Diese Parameter werden laststufenweise zusammengefasst und über die gesamte Lastgeschichte kumuliert.

Als *plastische Verformungen* werden im Sinne der Arbeit alle irreversiblen Verformungsanteile aufgefasst, unabhängig davon, welche Ursache diese haben. In Abb. 5.2b ist am Beispiel der Längsdehnung dargestellt, was unter den zyklenspezifischen Zuwächsen an plastischen Verformungen verstanden wird. Der Laststufe 1 wird insgesamt die plastische Verformung $\varepsilon_{l,pl,1}$ zugeordnet, was der Summe der Einzelzuwächse der drei Zyklen entspricht. Zu bemerken ist, dass die Größe der plastischen Ver-

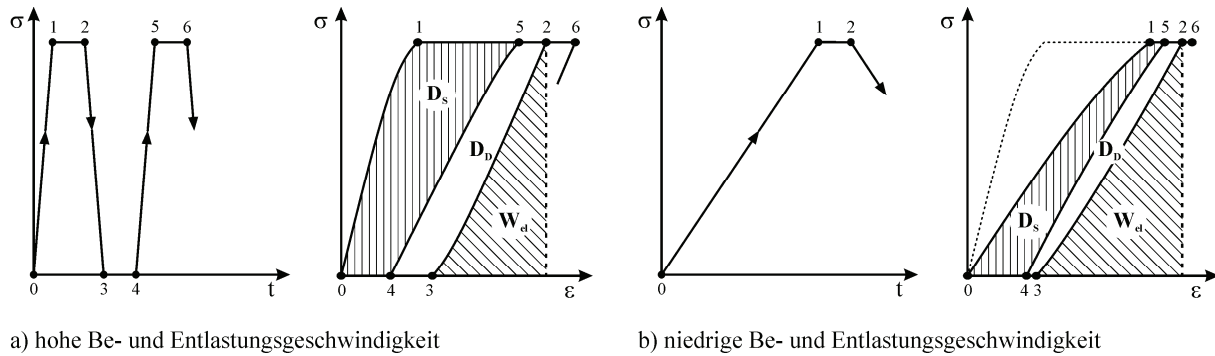


Abb. 5.3: Wechselwirkung zwischen Lastgeschichte, Spannungs-Dehnungs-Linien und Energieanteilen

formungen somit etwas überschätzt wird, weil die zeitabhängige Rückverformung am Ende der Entlastungsphasen noch nicht abgeschlossen ist.

Die mit den Längsverformungen und Gestaltänderungen korrespondierenden Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge werden hinsichtlich der für irreversible Strukturänderungen *dissipierten Formänderungsenergie* $D_{s,l}$ bzw. $D_{s,D}$ untersucht. Die Berechnungsmethode geht aus Kapitel 2.4 hervor. Die zyklenspezifisch berechneten Anteile werden analog zu den plastischen Verformungen in kumulierter Form dargestellt.

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die Energiebilanz von zeitabhängigen Phänomenen beeinflusst wird und eine exakte Trennung und Quantifizierung der Anteile schwerfällt. Um den Einfluss der Lastgeschichte auf die absoluten Beträge der berechneten Energieanteile zu verdeutlichen, sind in Abb. 5.3 die prinzipiellen Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge für zwei identische Probekörper dargestellt, bei denen lediglich unterschiedliche Belastungsgeschwindigkeiten gewählt wurden.

Die Prinzipdarstellung zeigt, dass die gesamte Energiebilanz von der Lastgeschichte abhängt. Eine geringe Belastungsgeschwindigkeit hat zur Folge, dass ein maßgeblicher Teil von Strukturänderungen und anelastischen Verformungen bereits eintritt, bevor die zyklenspezifische Maximalspannung erreicht wird. Diese Strukturreaktionen entziehen sich der Auswertung, sodass der Absolutwert von D_s , d. h. der für irreversible Strukturänderungen dissipierte Energieanteil kleiner ausfällt. Ein entsprechender Einfluss auf die Anteile D_D und W_{el} ist vorhanden. Weiterhin ist zu beachten, dass die zeitabhängige Rückverformung zum Zeitpunkt 4 nicht als abgeschlossen angesehen werden kann.

Im Zusammenhang mit den nachfolgend dargestellten Versuchsergebnissen werden die beschriebenen Energieanteile herangezogen, um die Akkumulation struktureller Änderungen über die Lastgeschichte anhand des Tragverhaltens aufzuzeigen. Den Absolutwerten wird keine Bedeutung beigemessen. Das Ausmaß der vorangehend beschriebenen Phänomene wird zudem dadurch reduziert, dass die Beanspruchungen zügig aufgebracht werden und die Schrittweite zwischen den einzelnen Laststufen klein ist. Die Interpretationen zur Akkumulation struktureller Änderungen sind folglich nicht infrage gestellt.

5.2.2 Feuchtegehalt, Trockenrohdichte, Schwindverhalten

Anhand der Wägungen, die in der Einlagerungsphase an jedem Probekörper vorgenommen wurden, lassen sich indirekt Rückschlüsse auf den Feuchtegehalt der Probekörper ziehen. Je nach Materialbeschaffenheit stellte sich der Ausgleichszustand bezüglich des Feuchtegehalts unter den Laborbedingungen nach etwa 1000 bis 5000 Stunden ein, Abb. 5.4.

Der im Anschluss an die Versuche nach DIN EN 1353 (1997) ermittelte *massebezogene Feuchtegehalt* und die nach DIN EN 678 (1994) bestimmte *Trockenrohdichte* sind in Tabelle 5.4 angegeben. Aus diesen Werten lässt sich ableiten, dass der massebezogene Feuchtegehalt im Lieferzustand etwa zwischen 9 % und 31 % lag, Tabelle 5.4.

Tab. 5.4: Massebezogener Feuchtegehalt und Trockenrohdichte

Serie	1	2	3
massebezogener Feuchtegehalt			
im Lieferzustand:	30,6 %	8,6 %	24,3 %
im Ausgleichszustand:	3,3 %	2,5 %	4,9 %
Trockenrohdichte	0,58 g/cm ³	0,67 g/cm ³	0,39 g/cm ³

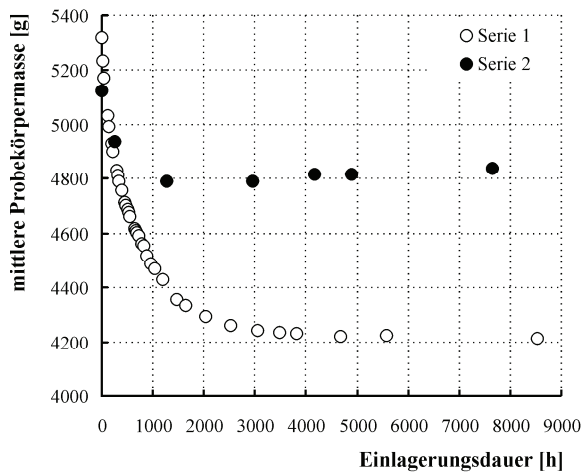
Die mit der Feuchtigkeitsabgabe einhergehenden *Schwindverformungen* sind für jeweils einen Probekörper der Serien 1 und 2, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten geliefert wurden, in Abb. 5.4c dargestellt. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass die gemessenen Längsdehnungen als Volumenänderungen aufgefasst werden können.

Abbildung 5.4 lässt erkennen, dass die Probekörper nach der Herstellung zum Quellen, d. h. zur Volumenzunahme tendieren. An den Probekörpern der Serien 1 und 2 wurde bis zum Erreichen des Ausgleichszustandes eine Volumenzunahme von rund 0,15 mm/m bzw. 0,10 mm/m festgestellt, wobei zu bemerken ist, dass der Feuchtegehalt der Probekörper bei Einlagerungsbeginn nicht übereinstimmte.

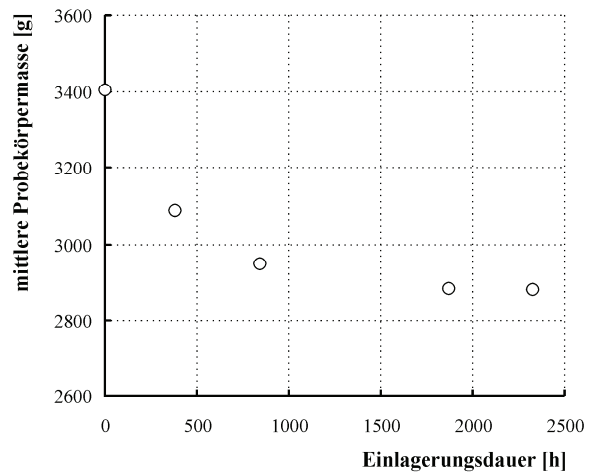
Einige Wochen nach Beginn der Schwindmessungen fiel die Klimaanlage des Labors aus, was sich auf die relative Luftfeuchtigkeit und somit auf den Feuchtegehalt der Probekörper auswirkte. Die Lufttemperatur blieb nahezu konstant, Anhang A.

Aufgrund der schwankenden klimatischen Verhältnisse konnten weitere Beobachtungen zum Schwindverhalten des Porenbetons gemacht werden. Es zeigt sich, dass die Anfangsphase, die von einer maßgeblichen Verringerung der Probekörpermasse infolge Feuchtigkeitsabgabe gekennzeichnet ist, mit einer Volumenzunahme einhergeht. Im fortgeschrittenen Stadium kommt dieser Prozess zum Erliegen. Somit entsteht der Eindruck, dass ein Potential bezüglich der Volumenzunahme vorhanden ist, dem sich der Verformungszustand bei konstanten klimatischen Verhältnissen asymptotisch nähert.

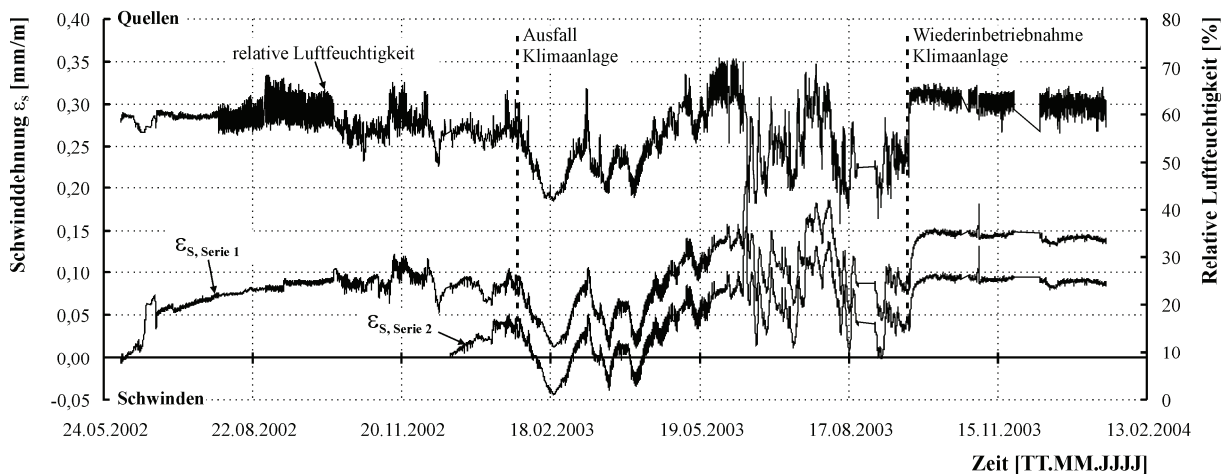
Durch den zwischenzeitlichen Ausfall der Klimaanlage, begleitet von zyklischen Änderungen der relativen Luftfeuchte, die mit affinen Änderungen des massebezogenen Feuchtegehalts der Probekörper korrespondieren, trat ein weiteres Phänomen bezüglich des Schwindverhaltens in Erscheinung. Entgegen der zuvor geschilderten Beobachtung ging in dieser Phase die Feuchtigkeitsabgabe mit Kontraktions- und die Feuchtigkeitsaufnahme durch den Porenbeton mit Expansionserscheinungen der



a) mittlere Probekörpermasse (Serien 1 und 2)



b) mittlere Probekörpermasse (Serie 3)



c) Schwindverformungen (Serien 1 und 2), relative Luftfeuchtigkeit

Abb. 5.4: Probekörpermasse, Luftfeuchtigkeit und Schwindverformungen, beginnend mit dem Lieferzeitpunkt

Probekörper einher. Bereits geringfügige Änderungen der Luftfeuchtigkeit schlugen sich unmittelbar in signifikanten Formänderungen nieder, Abb. 5.4c. Die Differenz der serienabhängigen Schwindverformungen ($\varepsilon_{S, \text{Serie 1}} - \varepsilon_{S, \text{Serie 2}}$) blieb dabei nahezu konstant. Folglich war die Wirkung von Feuchtigkeitsänderungen der Umgebungsluft auf die Größe der Schwindverformungen der beiden Probekörper nahezu identisch.

Nach erfolgter Wiederinbetriebnahme der Klimaanlage stellte sich innerhalb kurzer Zeit ein nahezu unveränderter Zustand bezüglich der Schwindverformungen ein. Für die Untersuchungen zum Tragverhalten, die ausschließlich in dieser Phase durchgeführt wurden, können somit zusätzliche Schwindverformungen als vernachlässigbar angesehen werden.

5.2.3 Materialwiderstand

Der Materialwiderstand wird als Bruchnormalspannung angegeben, die auf den Probekörperquerschnitt wirkt. Für die Berechnung der Bruchspannung ist der Maximalwert der gemessenen Druckkraft maßgebend. Um einen mischungsübergreifenden Vergleich der Ergebnisse zu ermöglichen, werden *Beanspruchungsintensitäten*, d. h. bezogene Spannungen angegeben. Diese beziehen sich auf die mittleren Bruchspannungen, die im Rahmen der Standardversuche zur Bestimmung der Kurzzeitdruckfestigkeit für die einzelnen Chargen ermittelt wurden.

5.2.3.1 Kurzzeitdruckfestigkeit

In Tabelle 5.5 sind die mischungsspezifischen Mittelwerte der Druckspannungen im Bruchzustand dargestellt. Diese Werte werden im Rahmen der Arbeit als *Kurzzeitdruckfestigkeiten* f_{cm} verstanden und für die Berechnung der Beanspruchungsintensitäten als Referenzwerte herangezogen.

Tab. 5.5: Ergebnisse der Standardversuche zur Kurzzeitdruckfestigkeit

Serie		1	2	3
Probekörperanzahl		10	10	6
mittlere Bruchspannung	[N/mm ²]:	6,41	5,48	3,13
Standardabweichung	[N/mm ²]:	0,08	0,18	0,05
Variationskoeffizient	[%]:	1,19	3,22	1,65
5-%-Quantilwert	[N/mm ²]:	6,28	5,19	3,04
95-%-Quantilwert	[N/mm ²]:	6,53	5,77	3,21

(auf der Grundlage der Gaußschen Normalverteilung)

5.2.3.2 Weitere Kurzzeitdruckfestigkeitswerte

Die in Tabelle 5.6 angegebenen Widerstände beziehen sich auf weitere Versuche mit monoton gesteigerter Beanspruchung, wobei die Regelungsart und die Beanspruchungsgeschwindigkeit variiert wurden. Es ist jeweils die maximal erreichte Druckspannung ausgewiesen.

Tab. 5.6: Weitere Kurzzeitdruckfestigkeitswerte der Serien 1 und 3

Beanspruchungs- geschwindigkeit		0,001 N/mm ² /s	0,10 N/mm ² /s	10,0 N/mm ² /s	0,0002 mm/m/s	0,006 mm/m/s	1,0 N/mm ² /s
Probekörper		H 153	H 100P-01	H 157	H 150	H 152	317
Serie		1	1	1	1	1	3
max. Druckspannung σ_{\max}	[N/mm ²]	5,84	6,81	7,78	5,79	6,24	3,49
Beanspruchungs- intensität σ_{\max}/f_{cm}	[%]	91,2	106,3	121,4	90,3	97,4	111,5

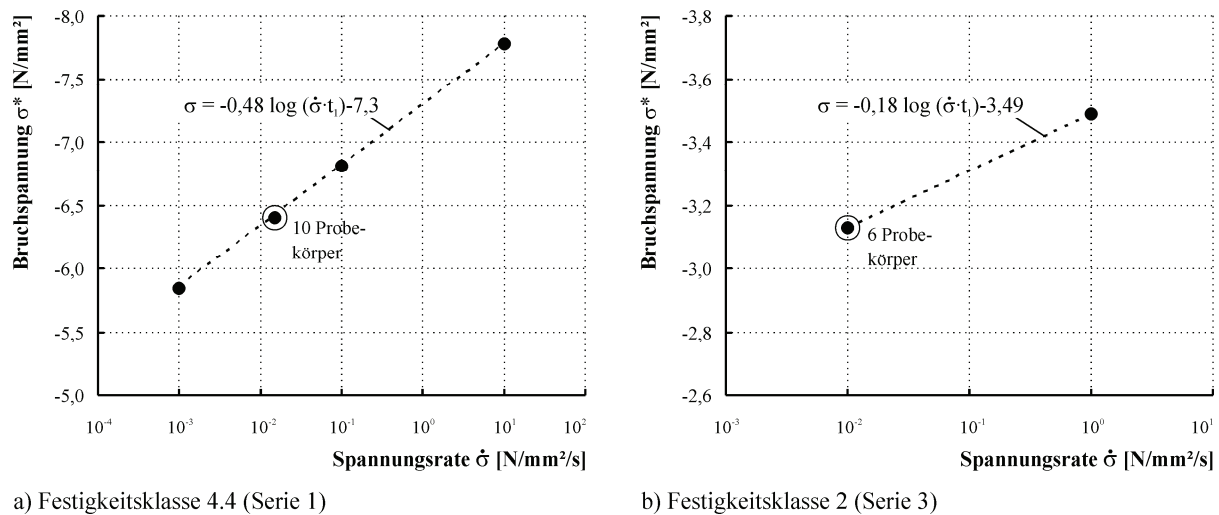


Abb. 5.5: Zusammenhang zwischen Bruchspannung und Belastungsgeschwindigkeit

Der empirische Zusammenhang zwischen der Spannungsrate $\dot{\sigma}$ in N/mm²/s und der ermittelten Bruchspannung σ in N/mm² kann für Serie 1 im untersuchten Bereich näherungsweise durch eine logarithmische Funktion beschrieben werden, Abb. 5.5. Bei der Berechnung der Koeffizienten wurden zusätzlich die 10 Wertepaare der Probekörper, an denen die Kurzzeitdruckfestigkeit ermittelt wurde, berücksichtigt. Für Serie 1 lautet dieser Zusammenhang

$$\sigma = -0,48 \cdot \log(\dot{\sigma} \cdot t_1) - 7,3, \quad (5.5)$$

wobei $t_1 = 1$ s gilt. Die Ergebnisse von Henseleit (1983), vgl. Abb. 3.1, haben gezeigt, dass der Zusammenhang zwischen Beanspruchungsgeschwindigkeit und Bruchwiderstand weitgehend unbeeinflusst von der Festigkeitsklasse des Porenbetons ist. Unter dieser Annahme und unter der Voraussetzung vernachlässigbarer Festigkeitsstreuungen gilt für die Probekörper der Serie 3 im untersuchten Bereich

$$\sigma = -0,18 \cdot \log(\dot{\sigma} \cdot t_1) - 3,49. \quad (5.6)$$

5.2.3.3 Zeitstandfestigkeit, Dauerstandfestigkeit

Die Auswertungen zur Standfestigkeit erfolgen unter dem Aspekt der beanspruchungsabhängig ertragenen Standzeiten. Für die Probekörper, an denen die Kurzzeitdruckfestigkeit untersucht wurde, beträgt die Standzeit null Sekunden.

In Abb. 5.6a, b sind die Standzeiten für die Probekörper der Festigkeitsklassen 4.4 und 2 dargestellt, wobei ausschließlich die Probekörper berücksichtigt wurden, die zuvor keinerlei Beanspruchung ausgesetzt worden sind. Aus den Abbildungen geht hervor, dass die ertragenen Standzeiten umso größer sind, je kleiner der gewählte Belastungsgrad ist. Bei Belastungsgraden, die kleiner als 87% (Festig-

keitsklasse 4.4) bzw. 85% (Festigkeitsklasse 2) der Kurzzeitfestigkeit waren, konnte kein Versagen festgestellt werden.

Ein Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit Angaben aus [Sell & Zelger 1969], die sich ebenfalls auf Untersuchungen an Porenbeton beziehen, ist mit Abb. 5.6c möglich. Tendenziell stimmen die Ergebnisse überein, weisen aber signifikante Unterschiede im Hinblick auf die bezogenen Dauerstandfestigkeiten auf. Die von Sell & Zelger (1969) festgestellten, vergleichsweise niedrigen Versagensspannungen von etwa 65% der Kurzzeitdruckfestigkeit konnten mit den eigenen Versuchen nicht bestätigt werden.

Ergänzend zu den Einzelwerten sind in den Diagrammen die auf theoretischen Annahmen basierenden Regressionsfunktionen angegeben. Der *funktionelle Ansatz* sollte folgende Grundanforderungen erfüllen:

- die Funktion soll einen von null verschiedenen unteren Grenzwert für den Belastungsgrad, die Dauerstandfestigkeit, ausweisen,
- beim oberen Grenzwert für den Belastungsgrad, dem die Kurzzeitdruckfestigkeit zugeordnet wird, soll der Einfluss der Standzeit verloren gehen.

Folgender Ansatz wurde gewählt

$$\frac{-\sigma(t, t_0)}{f_{cm}} = a + \frac{1-a}{1+b \cdot (t-t_0)} \quad (5.7)$$

mit: $-\sigma(t, t_0)$ = Zeitstandfestigkeit in N/mm²,
 f_{cm} = mittlere Kurzzeitdruckfestigkeit in N/mm²,
 a, b = Materialkoeffizienten,
 $t-t_0$ = Standzeit in s.

Die Koeffizienten a und b wurden mit Hilfe der Fehlerquadratmethode an die Versuchsergebnisse angepasst.

Bei den Probekörpern der Festigkeitsklasse 4.4 erfolgte die Anpassung zunächst getrennt für die Serien 1 und 2, Gl. 5.8 und Gl. 5.9. Die resultierenden Dauerstandfestigkeiten weichen um etwa 1% der Kurzzeitdruckfestigkeit voneinander ab. Diese Differenz wird als vernachlässigbar angesehen. Im Rahmen der weiteren Auswertungen zur bezogenen Dauerstandfestigkeit werden deshalb die Serien 1 und 2 nicht mehr separat analysiert. Die gemeinsame Regressionsfunktion entspricht Gl. 5.10. Für Serie 3 ergibt sich entsprechend Gl. 5.11 ein etwas geringerer Auslastungsgrad für die Dauerstandfestigkeit.

$$\frac{-\sigma(t, t_0)}{f_{cm}} = 0,898 + \frac{0,102}{1+0,016 \cdot (t-t_0)} \quad (5.8)$$

$$\frac{-\sigma(t, t_0)}{f_{cm}} = 0,887 + \frac{0,113}{1+0,039 \cdot (t-t_0)} \quad (5.9)$$

$$\frac{-\sigma(t, t_0)}{f_{cm}} = 0,890 + \frac{0,110}{1+0,023 \cdot (t-t_0)} \quad (5.10)$$

$$\frac{-\sigma(t, t_0)}{f_{cm}} = 0,862 + \frac{0,138}{1 + 0,017 \cdot (t - t_0)} \quad (5.11)$$

In Abb. 5.6d sind weitere Regressionsfunktionen dargestellt, deren Ansätze für Normalbeton entwickelt wurden.

Nach Model Code 90 (1991) wird die infolge Dauerbelastung einsetzende zeitabhängige Abnahme der Festigkeit von Normalbeton unter Ausschluss der Nacherhärtung mit Gl. 3.2 erfasst. Der Koeffizient $\beta_{c,sus}(t, t_0)$ gibt den zum Zeitpunkt t vorliegenden Materialwiderstand, bezogen auf den Ausgangswiderstand, die 28-Tage-Festigkeit, an. Standzeiten, die kleiner als 20 Minuten sind, können von der Gleichung nicht erfasst werden, d. h. sie gilt für $(t - t_0) > 0,015 \text{ d}$.

Nach Anpassung der Koeffizienten an die Versuchsergebnisse ergibt sich für Porenbeton der Festigkeitsklasse 4.4 Gl. 5.12, vgl. Abb. 5.6d. Die Beschränkung bezüglich der Mindestbelastungsdauer wurde auf die minimale im Versuch erreichte Standzeit von 19 s abgestimmt.

$$\frac{-\sigma(t, t_0)}{f_{cm}} = 0,959 - 0,043 \left\{ \ln \left[4547 \left(\frac{t - t_0}{t_1} \right) \right] \right\}^{1/4} \quad (5.12)$$

Der Ansatz nach Model Code 90 (1991) wird bei Normalbeton in Zusammenhang mit einer weiteren Funktion kombiniert, mit der die zeitabhängige Festigkeitsentwicklung infolge Nacherhärtung erfasst wird. Im resultierenden Funktionsverlauf ergibt sich damit bezüglich der Spannung ein Minimum, dem die kritische Spannung zugeordnet wird, vgl. Abb. 3.4. Ein solches Minimum kann sich bei Porenbeton nicht ausbilden, da der Funktionsansatz zur Berücksichtigung der Nacherhärtung entfällt, siehe Gl. 3.1. Die resultierende Funktion entspricht Gl. 5.12.

Für die Untersuchungen an Porenbeton scheint der Ansatz nach Model Code 90 (1991) weniger geeignet, da dieser den Materialwiderstand bei hohen Dauerbeanspruchungen unterschätzt und keinen Wert für die Dauerstandfestigkeit ausgibt.

Ein weiterer Ansatz wurde von Hellesland & Green (1972) für Normalbeton entwickelt. Analog zu Model Code 90 (1991) werden darin die gegenläufigen Einflüsse von Nacherhärtung und beanspruchungsbedingtem Festigkeitsabbau unterschieden. Der Term, mit dem die Grenzkurve der ertragenen Standzeiten für entsprechende Beanspruchungsintensitäten unter Ausschluss der Nacherhärtung berechnet wird, lautet

$$C_t(t, t_0) = \frac{-\sigma(t, t_0)}{f_{cm}} = \eta_1 + \frac{\eta_2}{\eta_3 + \log(t - t_0 + t_a)} \quad (5.13)$$

mit: $C_t(t, t_0)$ = normierter Materialwiderstand,
 $t - t_0$ = Standzeit in min,
 t_a = 2 min,
 $\eta_1 \dots \eta_3$ = Materialkonstanten.

Darin ist die für die Lastaufbringung erforderliche Zeitdauer t_a mit zwei Minuten veranschlagt. Bezüglich einer Mindestbelastungsdauer gibt es keine Restriktionen. Mit dem Koeffizienten η_1 wird der un-

tere Grenzwert für den Materialwiderstand, d. h. die Dauerstandfestigkeit, erfasst. Beanspruchungen mit Intensitäten, die kleiner als η_I sind, haben keinen Einfluss auf die ertragene Standzeit. Für Normalbeton werden von Hellesland & Green die in Gl. 5.14 enthaltenen Koeffizienten vorgeschlagen.

$$C_t(t, t_0) = 0,75 + \frac{0,213}{0,55 + \log(t - t_0 + 2)} \quad (5.14)$$

Für die an Porenbeton der Festigkeitsklasse 4.4 experimentell ermittelten Standzeiten ergibt sich nach Anpassung der Parameter Gl. 5.15. In der Gleichung wurde die Zeitdauer für die Lastaufbringung von 2 auf 6 Minuten geändert.

$$\frac{-\sigma(t, t_0)}{f_{cm}} = 0,887 + \frac{0,005}{-0,734 + \log(t - t_0 + 6)} \quad (5.15)$$

Der Koeffizient η_I nimmt den Wert 0,887 an und entspricht näherungsweise dem Parameter a in Gleichung 5.7 bzw. 5.10. Die in den Gleichungen 5.10 und 5.15 unterstellten Dauerstandfestigkeiten sowie die gesamten Funktionsverläufe sind nahezu identisch, Abb. 5.6d.

In [Rinder 2003] wurden Ergebnisse von Versuchen mit Dauerzugbelastung analysiert, die an hochfestem Beton durchgeführt wurden. Der vorgeschlagene Ansatz entspricht Gl. 5.16. Der Einfluss der Nacherhärtung auf den Materialwiderstand wurde nicht explizit erfasst.

$$\frac{\sigma(t, t_0)}{f_{ctm}} = a + (1 - a) \left(\frac{t_K}{t_K + t - t_0} \right)^n \quad (5.16)$$

Darin sind

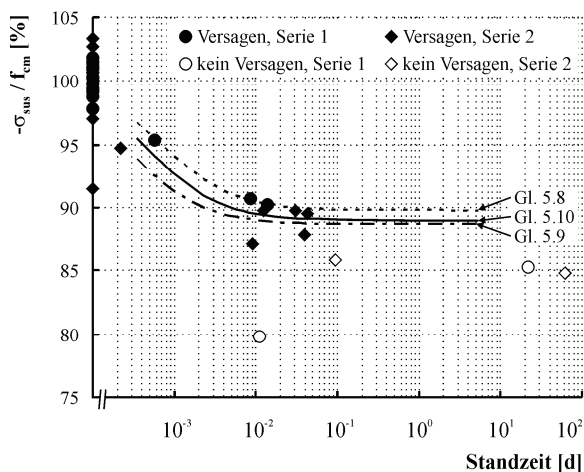
- f_{ctm} = mittlere Kurzzeitzugfestigkeit,
- a, n = Materialkoeffizienten,
- t_K = Versuchsdauer in s, die der Ermittlung der von f_{ctm} zugrunde liegt,
- $t - t_0$ = Standzeit in s.

Der Koeffizient a gibt die Beanspruchungsintensität an, der die Dauerstandfestigkeit zugeordnet ist. In [Rinder 2003] wurden für a die Werte 0,85 und 0,87, für n die Werte 0,20 und 6,67 angegeben.

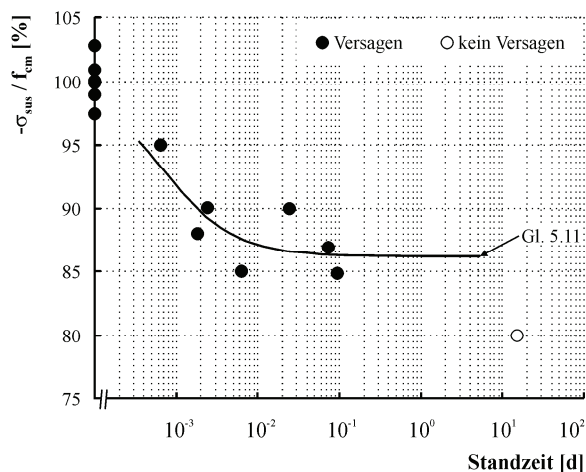
Der Ansatz lässt sich formal auf die an Porenbeton gewonnenen Versuchsergebnisse, denen Standversagen unter Druckbelastung zugrunde liegt, anwenden. Die Anpassung der Parameter an die ermittelten Standzeiten führt zu Gl. 5.17. Darin wurde $t_K = 360$ s gesetzt.

$$\frac{\sigma(t, t_0)}{f_{ctm}} = 0,893 + (1 - 0,893) \left(\frac{360}{360 + t - t_0} \right)^{6,27} \quad (5.17)$$

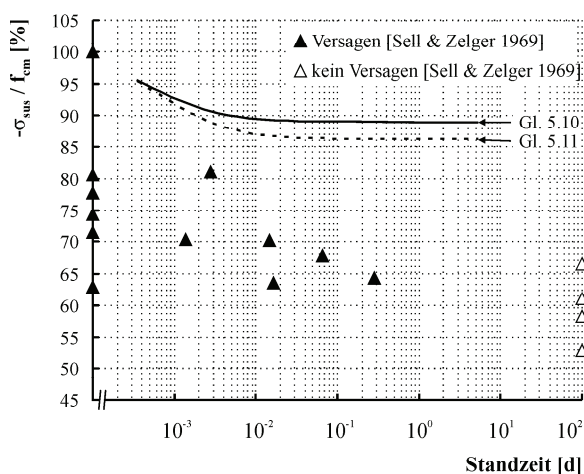
Die mit diesem Ansatz unterstellte Dauerstandfestigkeit entspricht 89,3% der Kurzzeitdruckfestigkeit und stimmt somit nahezu mit den nach Gl. 5.10 und 5.15 ermittelten Werten überein. Der Funktionsverlauf ist in Abb. 5.6d dargestellt.



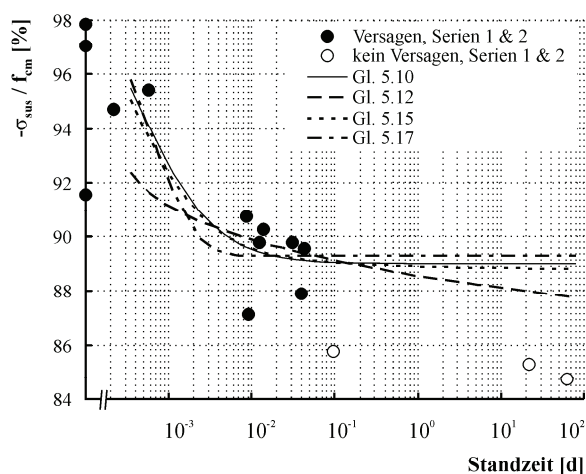
a) Serien 1 und 2



b) Serie 3



c) ermittelte Regressionsfunktionen, Versuchsergebnisse von [Sell & Zelger 1969]



d) Serien 1 und 2, weitere funktionelle Ansätze

Abb. 5.6: Ertragene Standzeit in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Für die praktische Anwendung bietet der eigene empirische Ansatz nach Gl. 5.7 Vorteile. Zur Beschreibung des Zusammenhanges genügen zwei Koeffizienten, die mit fehlerminimierenden Verfahren an Versuchsergebnisse angepasst werden können. Dies vereinfacht einerseits die Regressionsanalyse und verdeutlicht andererseits den Einfluss der Belastungsdauer auf den Materialwiderstand. Die Versuchswerte, die im Rahmen der Untersuchungen zur Kurzzeitfestigkeit ermittelt wurden, können zudem in die Regression einfließen, ohne dass weitere Angaben zur Lastaufbringung erforderlich sind. Im Ergebnis wird explizit ein Auslastungsgrad für die Dauerstandfestigkeit ausgewiesen.

5.2.3.4 Widerstand bei wiederholter Belastung

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden einige Probekörper wiederholten Belastungen ausgesetzt. Dies betraf Probekörper, bei denen im Rahmen der Dauerstandversuche kein Versagen eingetreten ist, sowie Probekörper, die planmäßig zyklisch beansprucht worden sind. Die Bewertung des Einflusses von Vorbeanspruchungen auf den Materialwiderstand erfolgt in der Weise, dass die bei wiederholter Belastung erreichten Belastungsdauern in die zuvor dargelegte Regression einbezogen

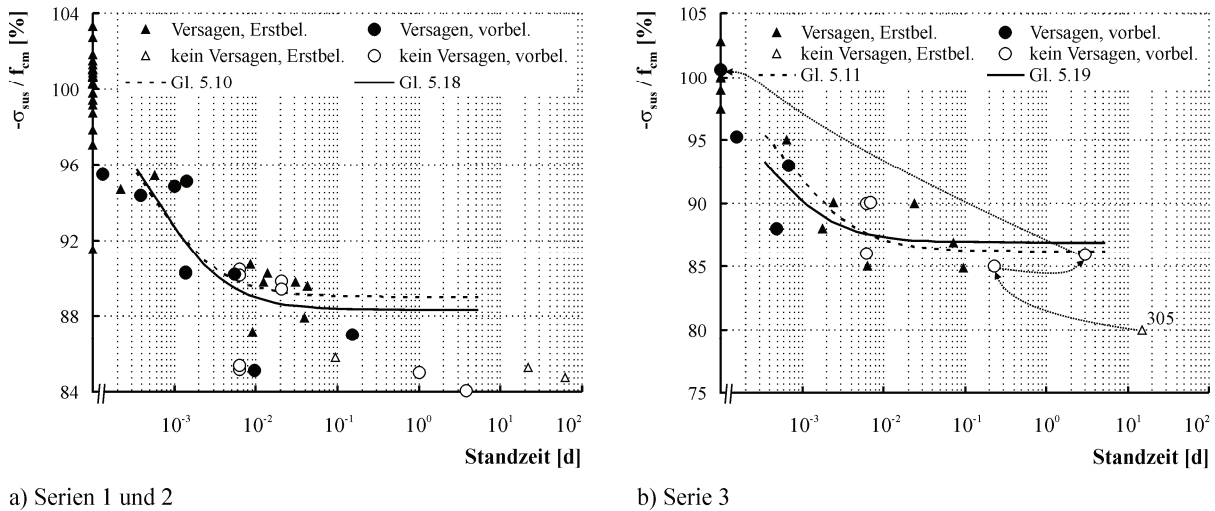


Abb. 5.7: Ertragene Standzeit in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität unter Berücksichtigung vorbelasteter Probekörper

werden. Jede Laststufe wird unabhängig von Vorbeanspruchungen analysiert, Zeitdauern von vorherigen Belastungszuständen werden nicht berücksichtigt. Auf die Analyse von Ermüdungserscheinungen wird, wie in Kapitel 3.2.3 näher erläutert, verzichtet.

Die zuvor bereits dargestellten Ergebnisse der Dauerstandversuche wurden in Abb. 5.7 durch die Wertepaare ergänzt, die an vorbelasteten Probekörpern ermittelt wurden. Augenscheinlich lässt sich anhand der erreichten Standzeiten kein Einfluss von Vorbelastungen feststellen. Die Wertepaare der vorbelasteten Probekörper fügen sich in die Punktwolke der nicht vorbelasteten Probekörper ein.

Mit Hilfe weiterer Regressionsanalysen lässt sich der Einfluss von Vorbelastungen auf den Materialwiderstand quantifizieren. Inklusive der vorbelasteten Probekörper ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\frac{-\sigma(t, t_0)}{f_{cm}} = 0,883 + \frac{0,117}{1 + 0,019 \cdot (t - t_0)} \quad (\text{für Festigkeitsklasse 4.4}), \quad (5.18)$$

$$\frac{-\sigma(t, t_0)}{f_{cm}} = 0,869 + \frac{0,131}{1 + 0,035 \cdot (t - t_0)} \quad (\text{für Festigkeitsklasse 2}). \quad (5.19)$$

Die Gegenüberstellung mit den Gleichungen 5.10 und 5.11 zeigt, dass die Koeffizienten zur Beurteilung der Dauerstandfestigkeit nahezu übereinstimmen. Die Differenz beträgt für beide Festigkeitsklassen weniger als 1% der Kurzzeitdruckfestigkeit.

Anhand des Probekörpers 305 der Festigkeitsklasse 2 wurde darüber hinaus untersucht, inwiefern sich Zustände mit ruhenden Beanspruchungen auf die verbleibende Kurzzeitfestigkeit bzw. „Restfestigkeit“ auswirken. Der Probekörper wurde für längere Zeitdauer unterschiedlichen Beanspruchungsintensitäten ausgesetzt und zwischenzeitlich entlastet. Die Reihenfolge der Beanspruchungszustände ist in Abb. 5.7b angedeutet. Im Anschluss daran wurde die Belastung wie bei den Standardversuchen zur Bestimmung der Kurzzeitdruckfestigkeit bis zum Versagen gesteigert. Die festgestellte Bruchspan-

nung stimmt nahezu mit der mittleren Kurzzeitdruckfestigkeit überein, ein Einfluss der Vorbelastungen ist nicht erkennbar.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ruhende Beanspruchungen einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Widerstand des Porenbetons besitzen, wenn die Intensität der Spannungen die Dauerstandgrenze nicht überschreitet. Diese Belastungszustände bewirken weder eine signifikante Verringerung noch eine Erhöhung des makroskopischen Materialwiderstandes.

5.2.4 Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge, abgeleitete Größen

Die Auswertungen zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten erfolgen unter dem Aspekt, charakteristische Phasen des Tragverhaltens von Porenbeton abzugrenzen, wobei den Parametern zur Beurteilung der Dauerstandfestigkeit als Grenze der stabilen Phase des Tragverhaltens besondere Bedeutung zukommt. Um das Tragverhalten möglichst umfassend zu charakterisieren und zu dokumentieren, werden alle relevanten funktionellen Zusammenhänge in Diagrammform dargestellt, auch wenn diese zur Bewertung der Dauerstandfestigkeit im engeren Sinne nicht unmittelbar herangezogen werden.

In einigen Fällen sind Unregelmäßigkeiten bei der Verformungsmessung aufgetreten. Risse können bereits bei geringfügigen Rissöffnungen, d. h. auch vor Eintreten des Probekörpersversagens lokal zu erhöhten Beanspruchungen bzw. zum Ausfall der Dehnungsmessstreifen führen. Die Bruchbilder legen offen, dass vergleichsweise häufig einzelne Dehnungsmessstreifen von Rissen durchtrennt worden sind. Damit spiegeln zumindest die in der finalen Phase der Versuche ermittelten Verformungswerte nicht immer das makroskopisch als homogen angesehene Materialverhalten wider.

5.2.4.1 Monoton ansteigende Beanspruchung

In diesem Teil der Auswertung beziehen sich alle Angaben auf die Auswertung der gemessenen Gesamtdeformationen und die daraus abgeleiteten Größen. Eine Zerlegung in elastische und inelastische Verformungsanteile ist nicht möglich. Die Zusammenhänge, die im Rahmen der Standardversuche zur Bestimmung der Kurzzeitfestigkeit ermittelt wurden, sind in den Diagrammen hervorgehoben. Für den Fall, dass während der Versuche Messstellen ausgefallen sind, wird auf die Darstellung der Messwerte verzichtet. Diese Kurven sind lediglich im Anhang dargestellt.

Die **Längsdehnungen** sind in Abhängigkeit von der Spannung für die drei untersuchten Serien in Tafel 5.2a, c, e wiedergegeben. Mischungübergreifend und für alle Belastungsgeschwindigkeiten nehmen die Längsstauchungen mit steigender Spannung überproportional zu. Diese Tendenz ergibt sich auch aus den Abbildungen zum **Elastizitätsmodul** (Tafel 5.2b, d, f), aus denen zu erkennen ist, dass die Nichtlinearität bereits bei geringen Beanspruchungsintensitäten zum Tragen kommt.

Bei höheren Beanspruchungsintensitäten ist der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Materialreaktionen sowohl an den Spannungs-Längsdehnungs-Funktionen als auch am Elastizitätsmodul erkennbar. Eine Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit bewirkt einen steileren Anstieg der Spannungs-Längsstauchungs-Funktion und damit größere Werte für den Tangentenelastizitätsmodul.

Nach Kapitel 4 kann der steilere Anstieg nicht unmittelbar mit den elastischen Eigenschaften des Materials in Verbindung gebracht werden, da die gemessenen Verformungen elastische und inelastische Anteile beinhalten. Die größeren Werte für die Tangentensteifigkeit sind diesen Überlegungen folgend

wesentlich im inelastischen, zeitvarianten Materialverhalten begründet und zeigen lediglich scheinbar höhere Elastizitätsmoduln an. Rein formal ist damit die Bezeichnung Elastizitätsmodul für den Anstieg der Spannungs-Längsstauchungs-Funktion nicht exakt, wird aber im Zusammenhang mit Normalspannungs-Längsstauchungs-Funktionen üblicherweise als Maß für die Steifigkeit gebraucht.

Vor Eintreten des Probekörperversagens ist bei den zwei Probekörpern mit *weggeeregelter* Versuchsdurchführung ein geringfügiger Spannungsabfall zu beobachten. Die zugrundeliegende Gesamtversuchsdauer beträgt für den zügig beanspruchten Probekörper etwa 9 Minuten und für den langsam beanspruchten Probekörper etwa 3,5 Stunden. Nach Erreichen der Maximallast nahm die Spannung bei stetig steigender Längsdeformation bezogen auf den Maximalwert der Druckspannung beim zügig beanspruchten Probekörper um weniger als 0,5 % und beim langsam beanspruchten Probekörper um etwa 3,5 % ab, bevor das Versagen durch makroskopische Trennrisse eintrat. Die zugehörigen Steifigkeiten wurden ausschließlich für den ansteigenden Ast ausgewertet, Tafel 5.2b. Für die weiteren Untersuchungen ist dieser Abschnitt der Spannungs-Längsdehnungs-Funktion ohne Bedeutung, weil dieses Verhalten im instabilen Bereich, d. h. bei Spannungen oberhalb der Dauerstandgrenze aufgetreten ist.

Für den Bruchzustand ergeben sich in Abhängigkeit von der Mischungszusammensetzung unterschiedliche Werte für die Längsverformungen. Die Größe der Längsverformungen richtet sich ferner nach der Belastungsgeschwindigkeit: *Je größer die Belastungsgeschwindigkeit ist, umso größer ist die Bruchstauchung.*

Die **Querdehnungen** nehmen wie die Längsstauchungen mit steigender Beanspruchung überproportional zu, Tafel 5.2g, i, k. Ebenso ist der Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit erkennbar. Eine Besonderheit zeigt sich in den ermittelten Endwerten für die Querdehnungen. Im Vergleich zu den Bruchlängsstauchungen weisen diese wesentlich größere Streuungen auf, es lässt sich kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Beanspruchungsgeschwindigkeit und der ermittelten Querdehnung im Bruchzustand ableiten.

Abgesehen vom Bereich des Ansetzens, d. h. bis etwa 5 % der mittleren Kurzzeitdruckfestigkeit, nimmt das Verhältnis von **Querdehnung zu Längsstauchung** zunächst mit steigender Beanspruchung geringfügig ab, Tafel 5.2h, j, l. Der Minimalwert wird bei Spannungen erreicht, die zwischen 10 % und 30 % der mittleren Kurzzeitdruckfestigkeit liegen. Für Porenbeton der Festigkeitsklasse 4.4 ist der Minimalwert der Querdehnzahl mit 0,2 etwas kleiner als für Porenbeton der Festigkeitsklasse 2, bei dem das Minimum dieses Verhältniswertes etwa 0,23 beträgt.

Ausgehend vom Minimalwert bewirkt eine weitere Lasterhöhung zunächst ein moderates, kurz vor dem Versagen ein progressives Ansteigen der Querdehnzahl, d. h. die Querdehnungen nehmen im Vergleich zu den Längsstauchungen überproportional zu. Im hohen Lastbereich weichen die Funktionsverläufe als Folge der unterschiedlichen Beanspruchungsgeschwindigkeiten maßgeblich voneinander ab. Signifikante Zuwächse für die Querdehnzahl ergeben sich, unabhängig von der Beanspruchungsgeschwindigkeit, unmittelbar vor Eintreten des Probekörperversagens.

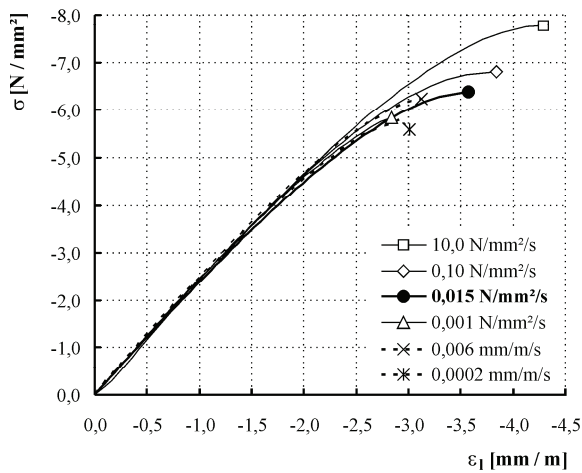
In Tafel 5.2m, o, q sind die Auswertungen für die **Volumenänderung** nach Gleichung 5.3 dargestellt. Das Volumen der Probekörper nimmt mischungsübergreifend mit zunehmender Beanspruchung zunächst ab, d. h. die Probekörper werden verdichtet. Unmittelbar vor dem Versagen ist kein einheitliches Spannungs-Dehnungs-Verhalten feststellbar. Bei einigen Probekörpern ist die Volumenabnahme

in dieser Phase rückläufig, wobei das Ausgangsvolumen der Probekörper nicht wieder erreicht wird. Dieses Phänomen kann sowohl bei langsam als auch bei zügig gesteigerter Beanspruchung festgestellt werden und ist nicht einer bestimmten Zusammensetzung des Porenbetons zuordenbar. Das minimale Probekörpervolumen, soweit dies zeitlich nicht mit dem Versagen zusammenfällt, stellt sich in Abhängigkeit von der Beanspruchungsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Beanspruchungsintensitäten ein.

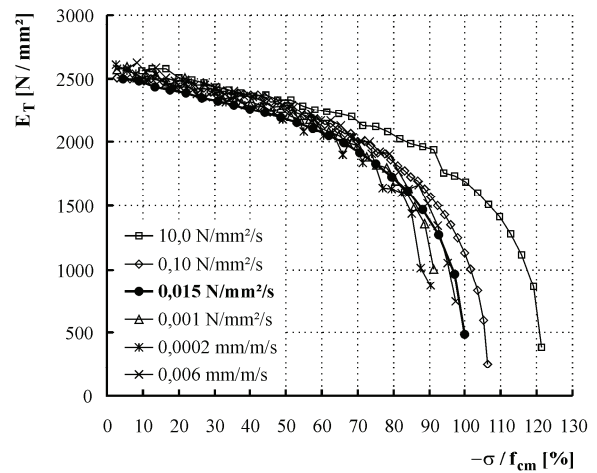
Der **Kompressionsmodul** (Gleichung 2.49) zeigt für beide Versagensbilder, d. h. sowohl im Falle kontinuierlich voranschreitender Materialverdichtung als auch im Falle einer relativen Zunahme des Volumens unmittelbar vor dem Versagen, ein Minimum im Funktionsverlauf, Tafel 5.2n, p, r. Dieses Minimum kennzeichnet, wie in Kapitel 3.4.2 dargelegt, das Ende der Phase, die mit steigender Beanspruchung von einer überproportionalen Verdichtung des Gefüges begleitet ist. Die dem Minimum zugeordnete Beanspruchungsintensität richtet sich wie bei allen Verformungsanteilen nach der Beanspruchungsgeschwindigkeit und hängt zudem von der Materialbeschaffenheit ab. Entsprechend den Ergebnissen wird der Minimalwert für den Kompressionsmodul bei den Probekörpern der Festigkeitsklasse 2 auf einem etwas niedrigeren Belastungsniveau erreicht, als bei den Probekörpern der Festigkeitsklasse 4.4.

Die funktionellen Zusammenhänge für die deviatorischen Anteile sind in Tafel 5.2s bis x dargestellt. Die **Gestaltänderungen** nehmen mit steigender Beanspruchung bis zum Versagen der Probekörper überproportional zu, höhere Beanspruchungsgeschwindigkeiten haben größere **Gleitmoduln** zur Folge. Im Versagenszustand ergeben sich in Abhängigkeit von der Materialbeschaffenheit und der Beanspruchungsgeschwindigkeit unterschiedliche Werte für die Gestaltänderungen.

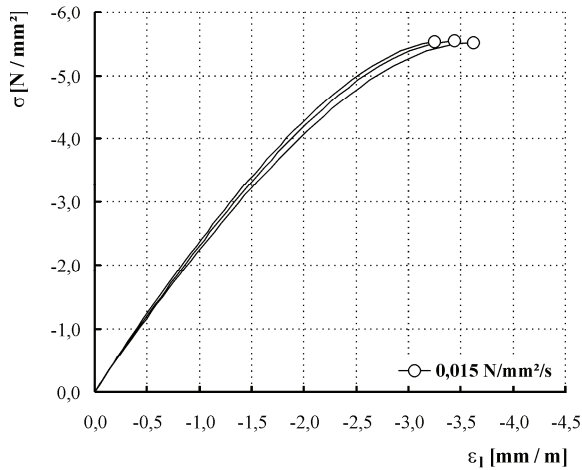
Tafel 5.2: Versuchsergebnisse: monoton ansteigende Beanspruchung



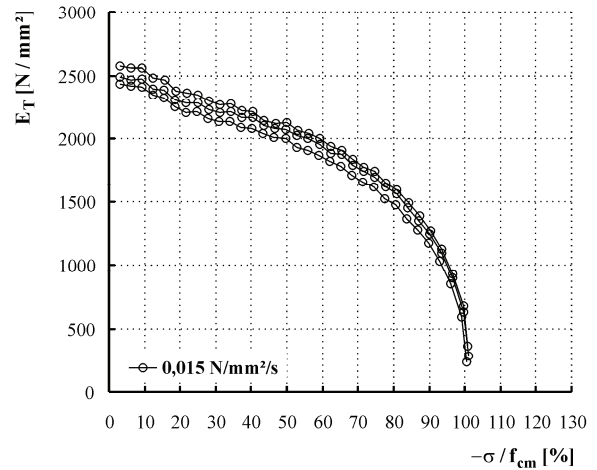
a) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 1



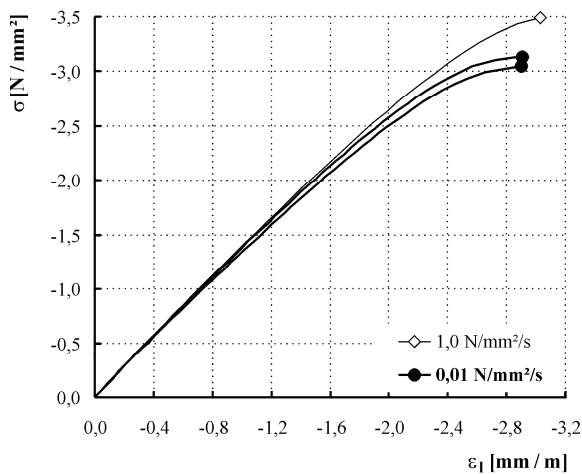
b) Elastizitätsmodul (Tangentenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



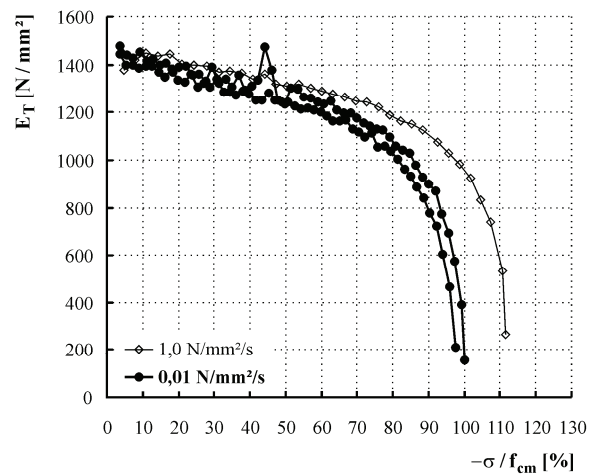
c) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 2



d) Elastizitätsmodul (Tangentenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 2



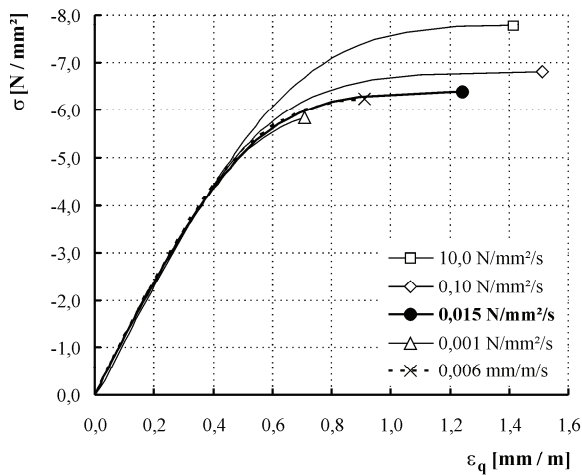
e) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 3



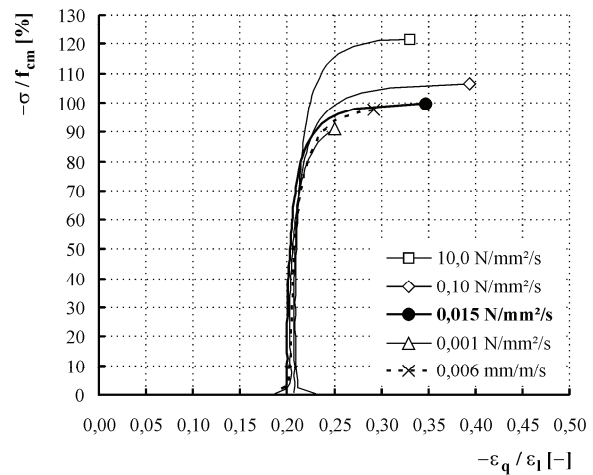
f) Elastizitätsmodul (Tangentenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3

Tafel 5.2: Versuchsergebnisse: monoton ansteigende Beanspruchung

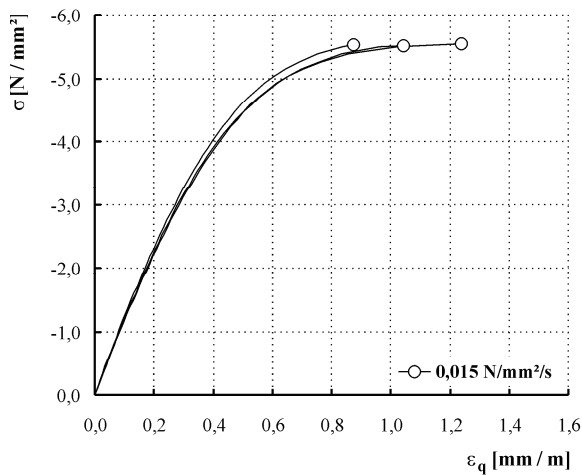
- Fortsetzung 1 -



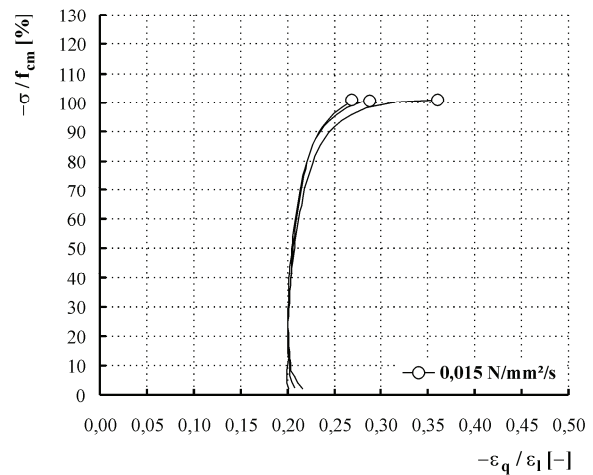
g) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 1



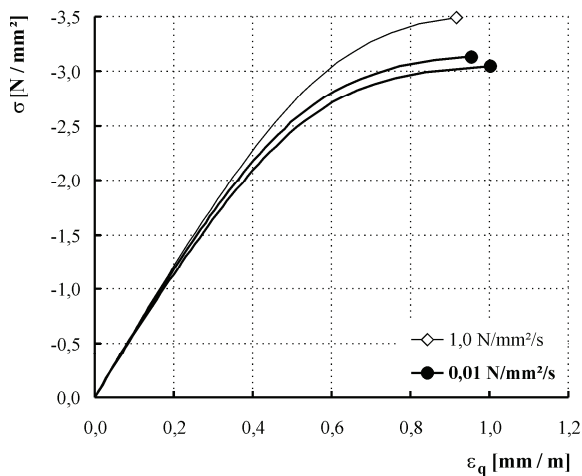
h) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



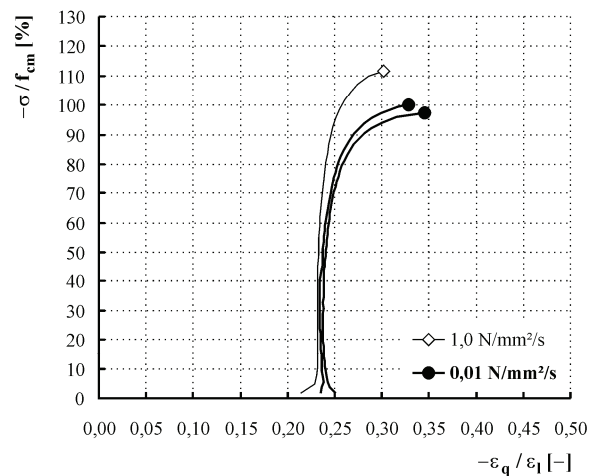
i) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 2



j) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 2



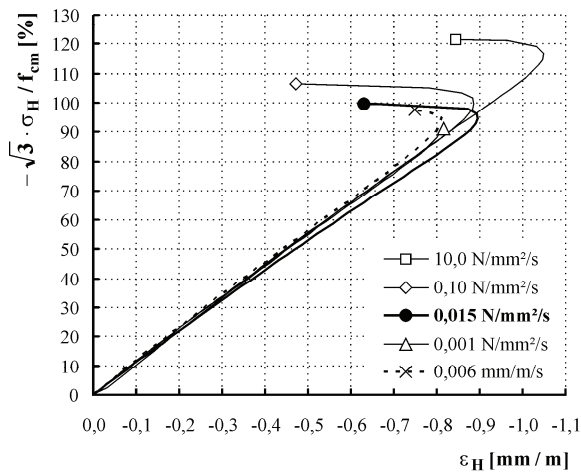
k) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 3



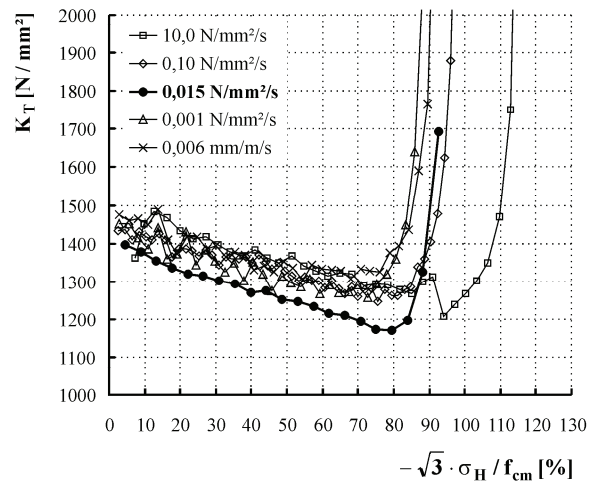
l) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3

Tafel 5.2: Versuchsergebnisse: monoton ansteigende Beanspruchung

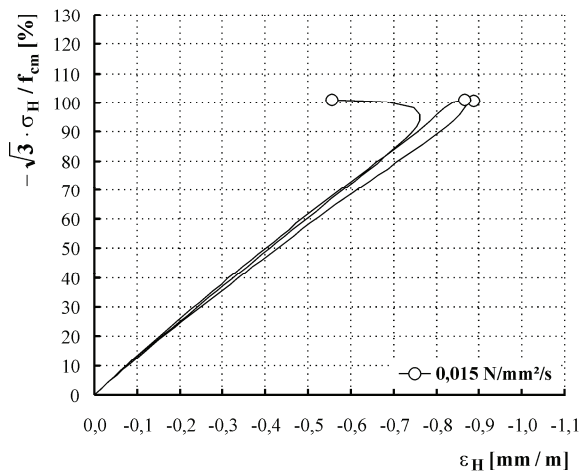
- Fortsetzung 2 -



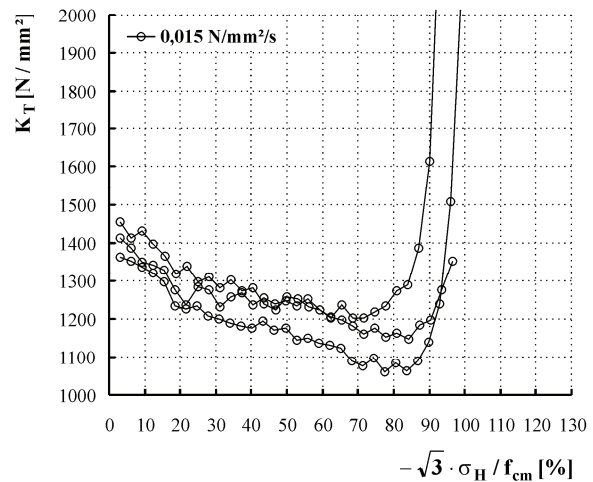
m) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



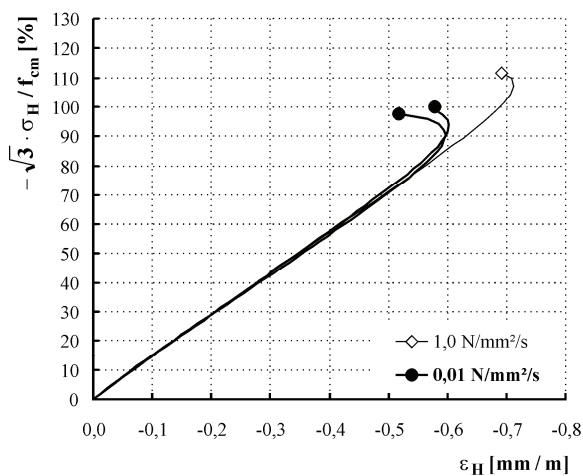
n) Kompressionsmodul (Tangentenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



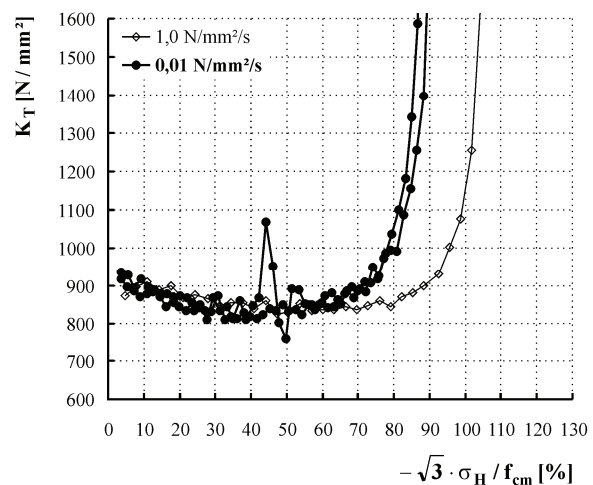
o) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 2



p) Kompressionsmodul (Tangentenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 2



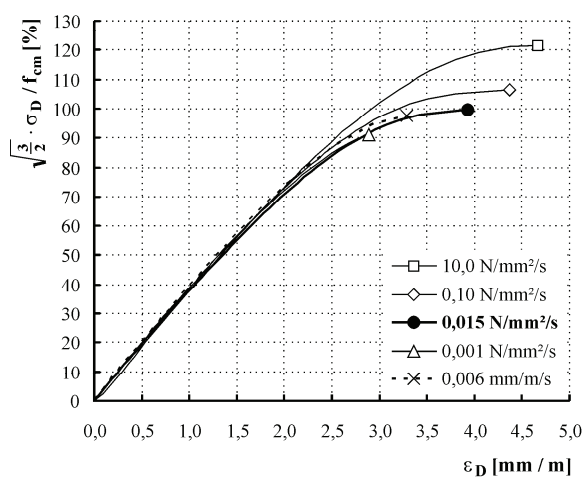
q) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3



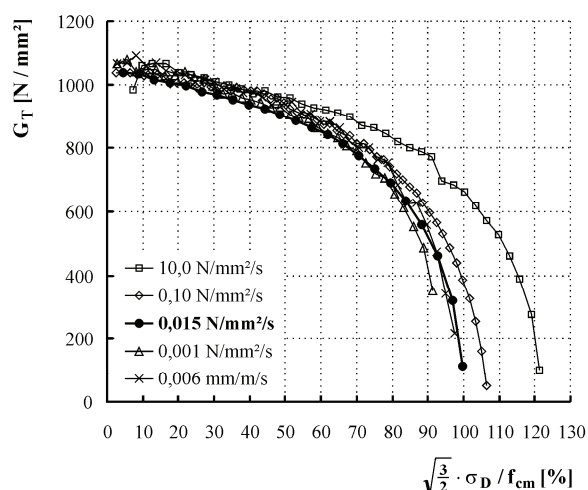
r) Kompressionsmodul (Tangentenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3

Tafel 5.2: Versuchsergebnisse: monoton ansteigende Beanspruchung

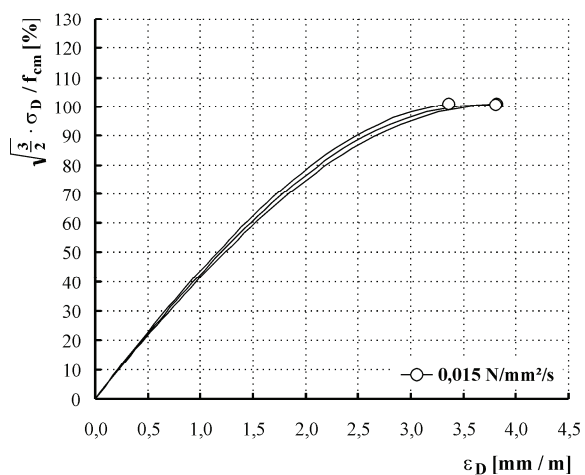
- Fortsetzung 3 -



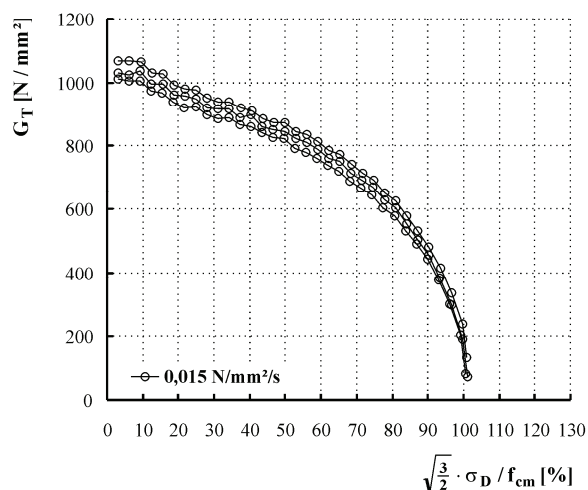
s) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



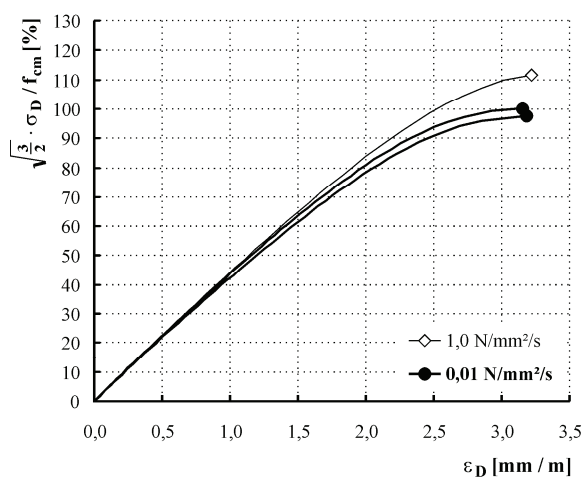
t) Gleitmodul (Tangentenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



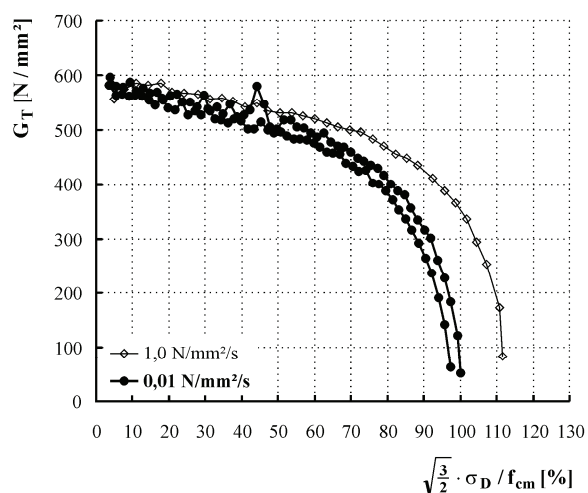
u) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 2



v) Gleitmodul (Tangentenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 2



w) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3



x) Gleitmodul (Tangentenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3

5.2.4.2 Ruhende Belastung

Mit den folgenden Darlegungen wird der Einfluss ruhender Belastung auf die Verformungen sowie die Querdehnzahl dokumentiert. Zur Erhöhung der Anschaulichkeit beziehen sich die Darstellungen für die zeitabhängige Entwicklung der einzelnen Parameter ausschließlich auf die Phase konstanter Spannungen. Um eine Beziehung zu den Ergebnissen der Kurzzeitversuche herzustellen, sind ergänzend die Kurven dargestellt, die im Rahmen der Standardversuche zur Bestimmung der Kurzzeitdruckfestigkeit ermittelt wurden. Zusätzlich sind Kurven von Probekörpern enthalten, bei denen im Rahmen der Versuche mit überwiegend ruhender Belastung nach entsprechender Versuchsdauer kein Versagen eingetreten ist. Diese Probekörper wurden entlastet und nach entsprechender Erholungszeit höheren Dauerbelastungen ausgesetzt.

Die *Längsstauchungen* und *Querdehnungen* der Probekörper nehmen in der gesamten Lasthaltephase zu, Tafel 5.3a-l. In dieser Phase ist bei allen Probekörpern zunächst ein zeitabhängiges Abklingen der Verformungszuwächse zu beobachten. Bei den höher beanspruchten Probekörpern erfolgt bereits nach kurzer Zeitdauer der Übergang zum Tertiärkriechen, das unmittelbar vom Versagen der Probekörper gefolgt wird.

Größere ertragene Standzeiten, die für niedrigere Beanspruchungsintensitäten charakteristisch sind, führen bei Porenbeton im Gegensatz zu Normalbeton nicht zu größeren Bruchlängsstauchungen, vgl. Abb. 3.10b. Der zeitabhängige Zuwachs der Längsstauchungen fällt im Vergleich zu den Anfangsverformungen wesentlich geringer aus als bei Normalbeton. Die Kriechwilligkeit der Serien 1 und 3 ist nahezu identisch, bezogen auf die Anfangsverformung ergibt sich ein zeitabhängiger Verformungszuwachs von bis zu 24 %. Für die Probekörper der Serie 2 beträgt dieser Zuwachs bis zu 35 % der Anfangsverformung. An vorbelasteten Probekörpern werden, unter Vernachlässigung der Vorbelastung, wesentlich kleinere Zuwächse festgestellt.

Die zuvor beschriebenen Verformungen beziehen sich auf Werte im Versagenszustand. Das Tertiärkriechen und die damit einhergehenden erheblichen strukturellen Änderungen sind somit in den Messwerten enthalten. Mit Hilfe eines Probekörpers, der für etwa 100 Tage einer Spannung, die 40 % der Kurzzeitdruckfestigkeit entspricht, ausgesetzt wurde, lässt sich ein Eindruck über das Primärkriechen des Porenbetons vermitteln. In diesem Zeitraum nahmen die Längsstauchungen des Probekörpers bezogen auf die Anfangsverformung lediglich um 16 % zu, siehe auch zusätzliche Ergebnisse im Anhang. Folglich ist nicht damit zu rechnen, dass die Endkriechzahl des Porenbetons größer als der in DIN 4223-1 (2003) angegebene Wert von $\varphi_{\infty} = 1,0$ ausfällt.

Der zeitabhängige Zuwachs der Querverformungen ist im Vergleich zum Zuwachs der Längsstauchungen für hoch beanspruchte Probekörper bei allen drei Serien wesentlich größer: Bezogen auf die Anfangsquerdehnung ergeben sich für Serie 1 bis 60 %, Serie 2 bis 100 % und Serie 3 bis 50 % Verformungszuwachs. Demgegenüber entspricht der Zuwachs der Querdehnungen beim moderat beanspruchten Probekörper mit 14 % nahezu dem der Längsstauchungen.

Aus den Messergebnissen geht damit hervor, dass die Längsstauchungen und Querdehnungen zumindest im Bereich hoher Beanspruchungen in Bezug auf deren zeitabhängige Entwicklung nicht denselben Gesetzen unterliegen. Die Querdehnungen weisen gegenüber den Längsstauchungen ein größeres zeitabhängiges Potential auf, wobei hinterfragt werden muss, welchen Anteil strukturelle Änderungen, wie z. B. Risse, an den makroskopischen Verformungen haben. Insbesondere unmittelbar vor dem Versagen sind häufig sprunghafte Änderungen der Querverformungen aber auch der Längsverformun-

gen festzustellen, die nicht als Materialeigenschaft interpretiert werden können, siehe Tafel 5.3. Diese Änderungen werden auf lokale Effekte im Bereich der Dehnungsmessstreifen zurückgeführt.

Die steigende Dominanz der Querverformungen bezüglich des Gesamtverformungsverhaltens wird anhand der ermittelten **Querdehnzahl** deutlich. Bei allen höher beanspruchten Probekörpern ist in der gesamten Lasthaltephase und besonders unmittelbar vor dem Versagen eine signifikante Erhöhung der Querdehnzahl festzustellen, Tafel 5.3m-r.

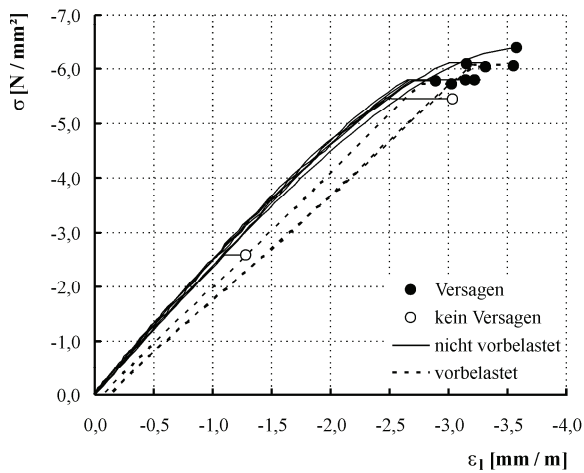
In Tafel 5.3s-x sind die aus den Längs- und Querverformungen berechneten **Volumenänderungen** aufgetragen. Das Volumen der Probekörper nimmt demzufolge bei allen Serien mit steigender Belastung zunächst ab. In der Phase konstanter Spannung zeichnen sich in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität *zwei entgegengesetzte Trends* für die Entwicklung der Volumendehnung ab. Dauerlasten niedriger Intensität führen den Ergebnissen zufolge grundsätzlich zu einer weiteren, zeitabhängigen Verdichtung der Struktur. Im Gegensatz dazu erfolgt bei hoch beanspruchten Probekörpern, bei denen in der Lasthaltephase das Versagen eingetreten ist, unmittelbar nach Erreichen der vorgesehenen Last der Übergang zu dilatantem Verhalten.

Entsprechend Tafel 5.3a-l ergeben sich sowohl für die Längs- als auch für die Querverformungen nicht zu vernachlässigende bleibende Verformungen. Bei den Serien 1 und 2 verhalten sich die bleibenden Längsstauchungen und die bleibenden Querdehnungen derart zueinander, dass die berechneten Volumendehnungen bei Entlastung nahezu auf null zurückgehen, Tafel 5.3s, u. Für diese Serien kann die Volumenänderung folglich durch einen elastischen und einen verzögert elastischen Verformungsanteil abgebildet werden. Die Probekörper der Serie 3 zeigen diesbezüglich ein anderes Verhalten, d. h. die Volumenänderungen sind nicht vollständig reversibel, Tafel 5.3w.

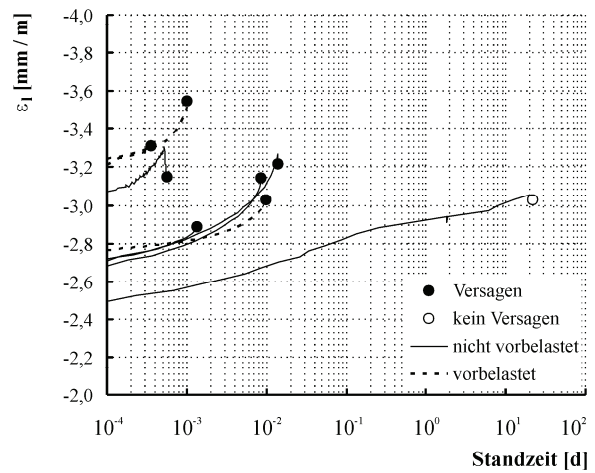
Die **Gestaltänderungen** nehmen mit steigender Beanspruchung und in der Lasthaltephase zu, Tafel 5.3y-ad. Ein einheitlicher Wert für die Gestaltänderungen im Versagenszustand lässt sich nicht ableiten. Abgesehen von der progressiven Zunahme der Gestaltänderungen vor dem Versagen lassen sich keine signifikanten Änderungen in den Funktionsverläufen erkennen. Die Gestaltänderungen setzen sich aus elastischen, verzögert elastischen und bleibenden Anteilen zusammen. Für die Serien 1 und 2 gilt entsprechend den Ergebnissen, dass sich die gesamten vorbeanspruchungsbedingten bleibenden Verformungen ausschließlich in den Gestaltänderungen widerspiegeln. Für Untersuchungen zur Akkumulation lastgeschichtlich bedingter Strukturänderungen, die irreversible Verformungen bewirken, sind damit die Gestaltänderungen von besonderer Bedeutung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Belastungszustände, deren Intensität die Dauerstandfestigkeit des Porenbetons übersteigt, anhand der Volumenänderungen erkennbar sind. Diese Zustände zeichnen sich durch dilatantes Materialverhalten aus.

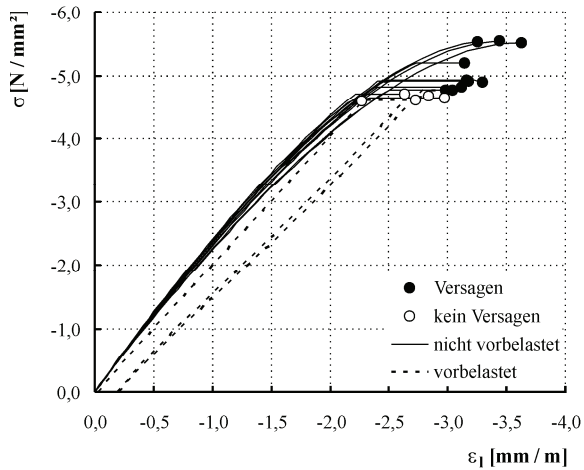
Tafel 5.3: Versuchsergebnisse: ruhende Belastung



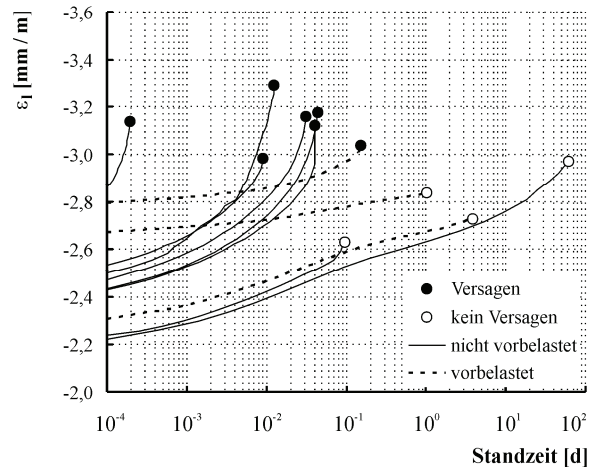
a) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 1



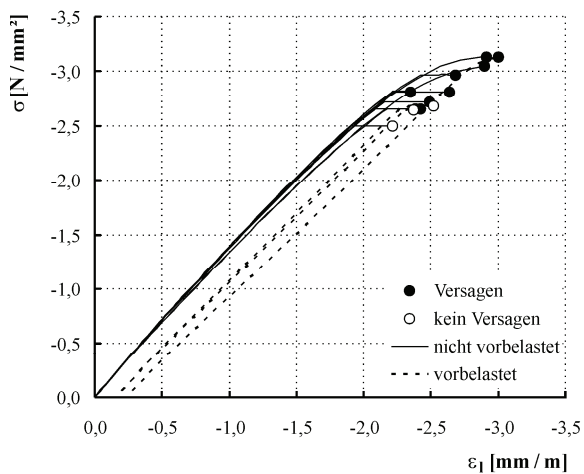
b) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung, Serie 1



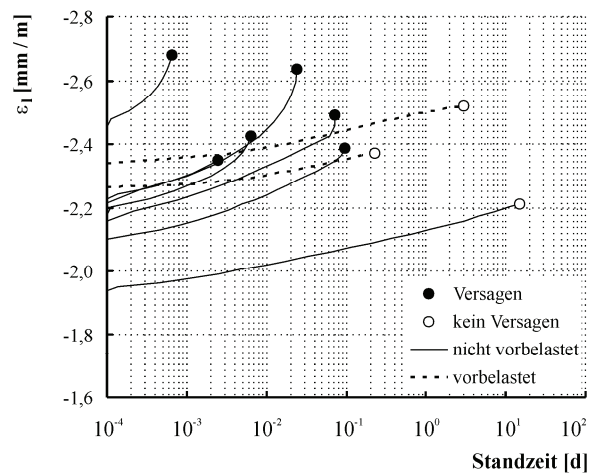
c) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 2



d) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung, Serie 2



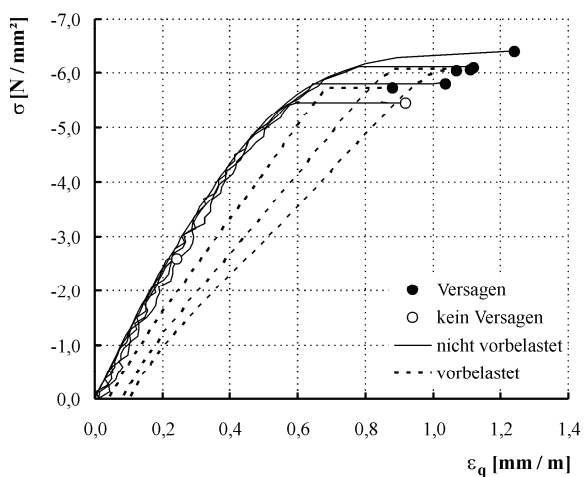
e) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 3



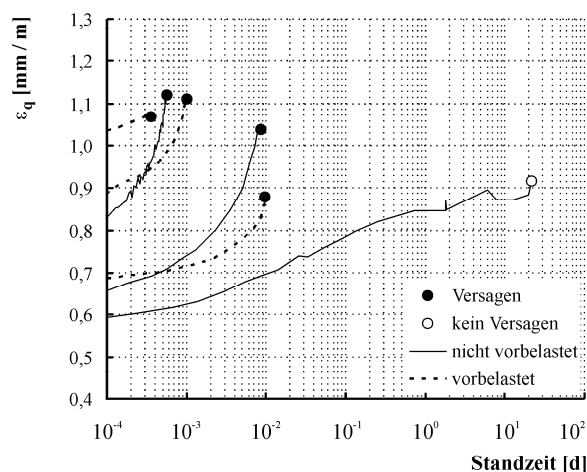
f) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung, Serie 3

Tafel 5.3: Versuchsergebnisse: ruhende Belastung

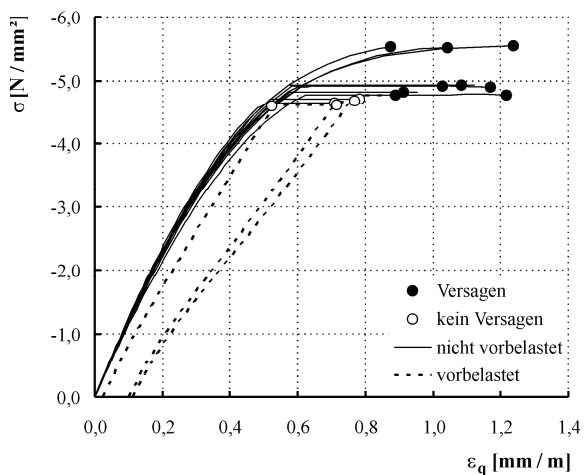
- Fortsetzung 1 -



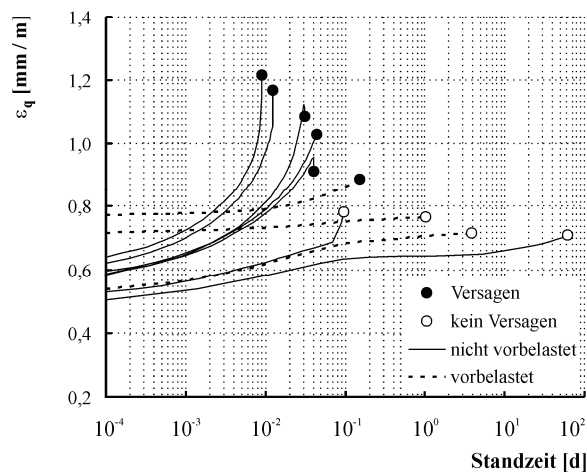
g) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 1



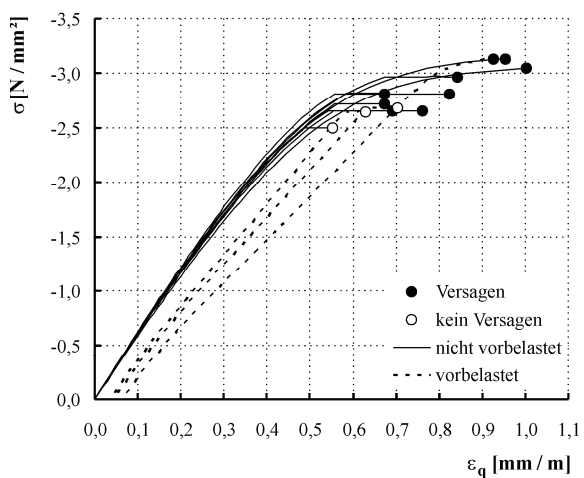
h) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung, Serie 1



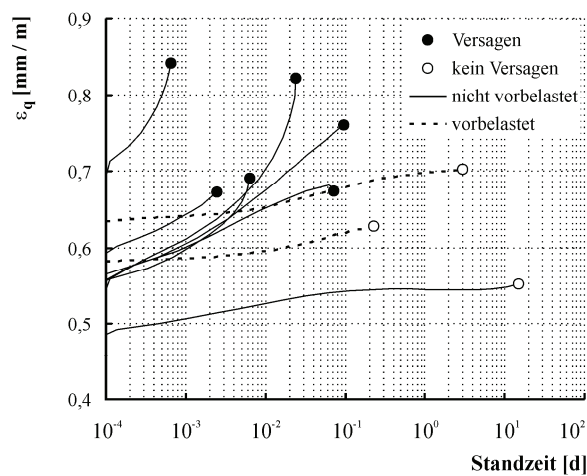
i) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 2



j) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung, Serie 2



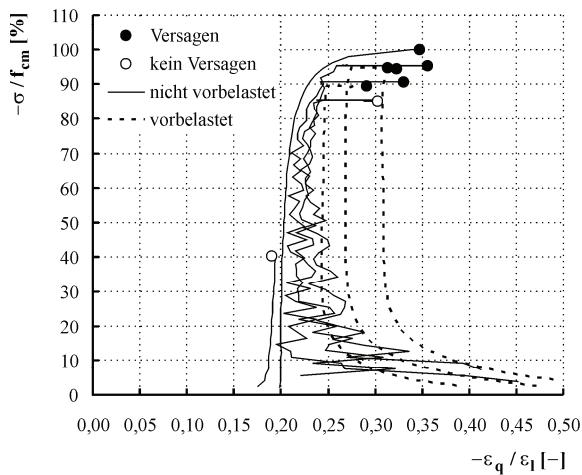
k) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 3



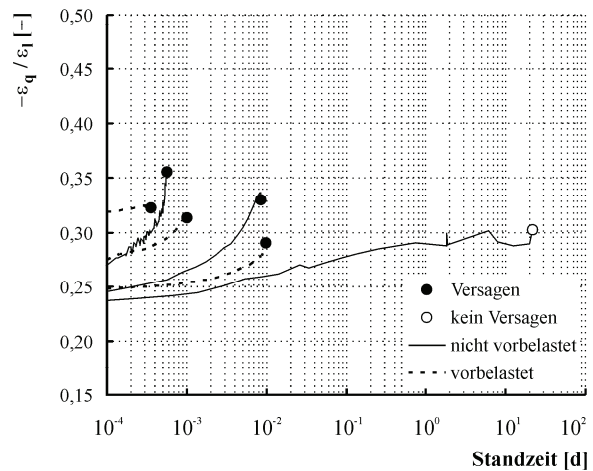
l) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung, Serie 3

Tafel 5.3: Versuchsergebnisse: ruhende Belastung

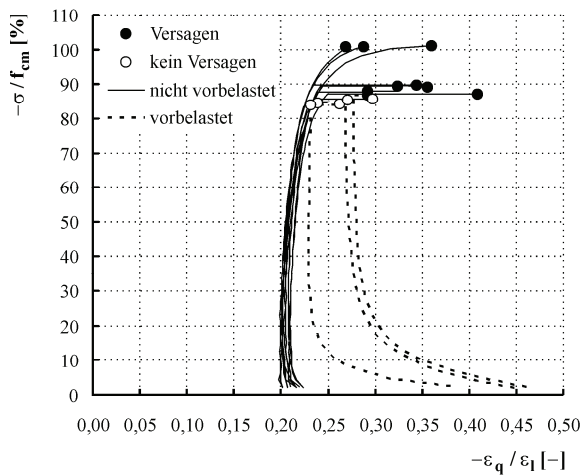
- Fortsetzung 2 -



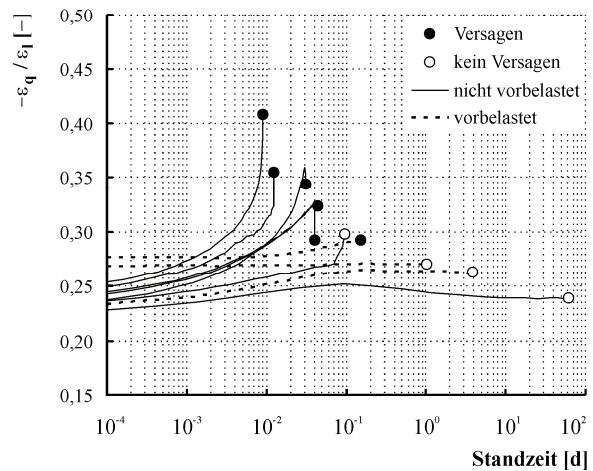
m) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



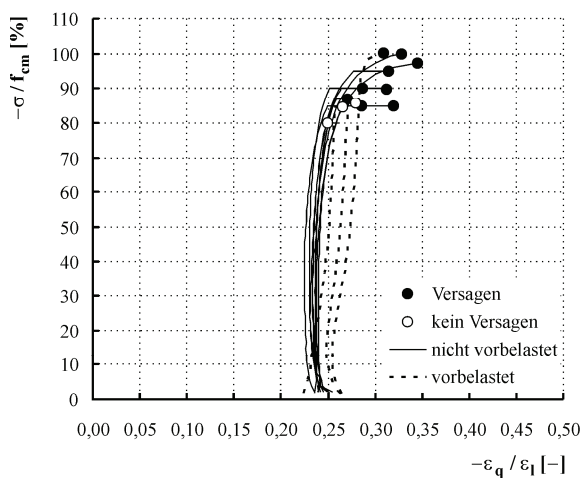
n) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung, Serie 1



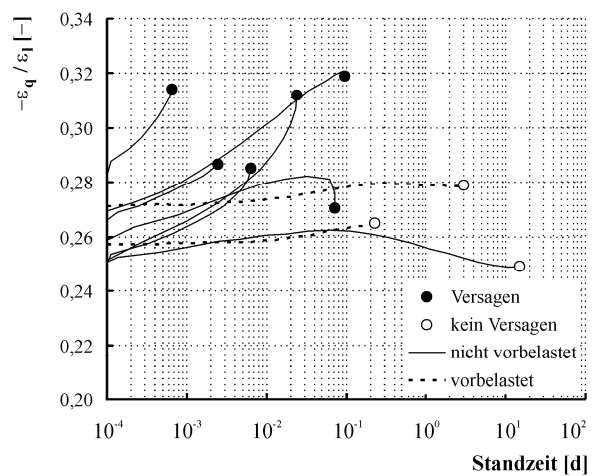
o) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 2



p) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung, Serie 2



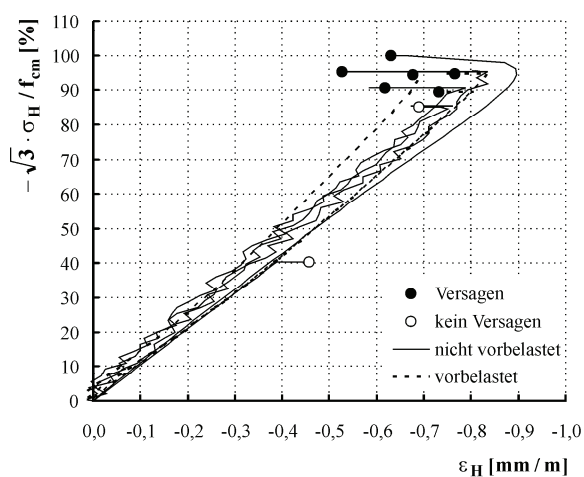
q) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3



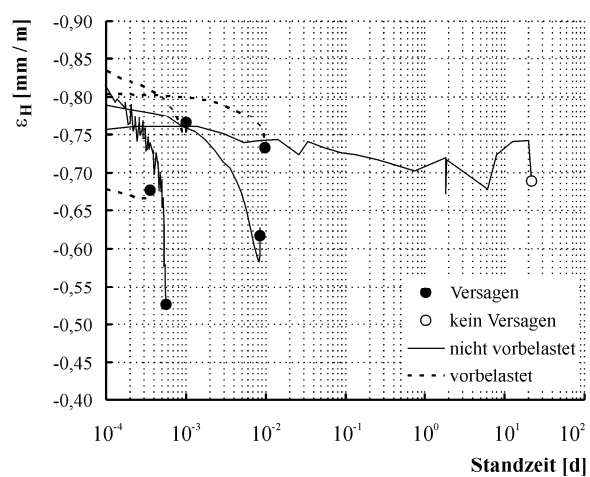
r) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung, Serie 3

Tafel 5.3: Versuchsergebnisse: ruhende Belastung

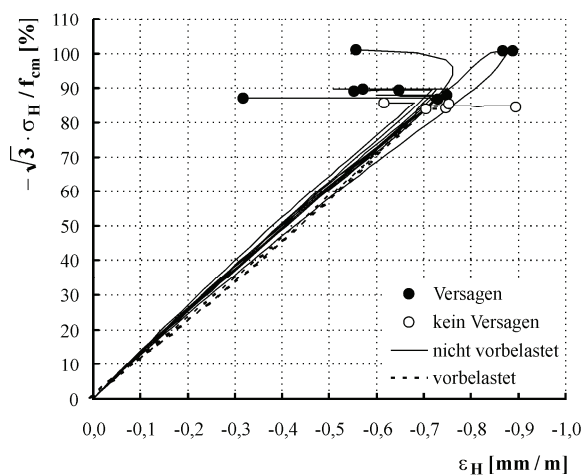
- Fortsetzung 3 -



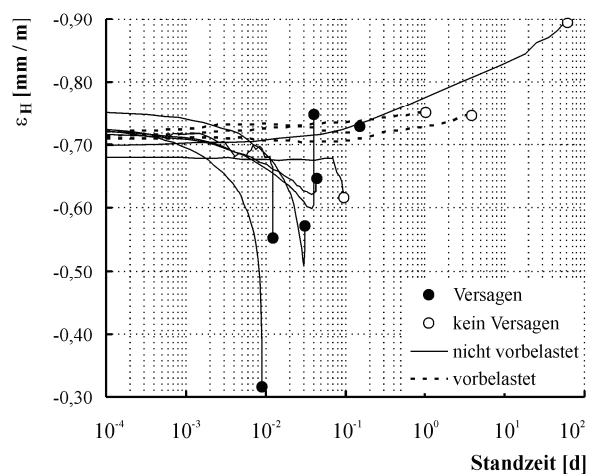
s) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



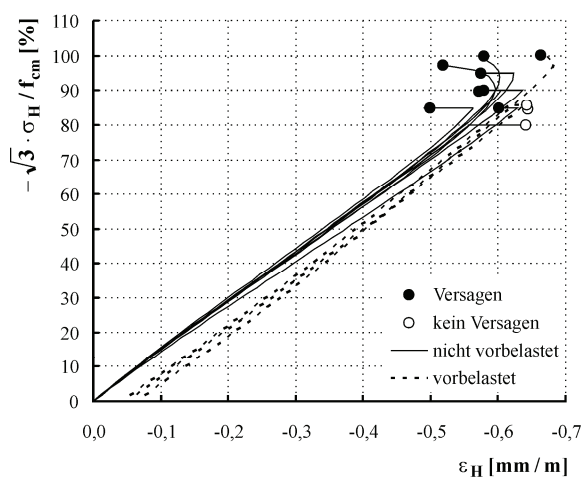
t) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung, Serie 1



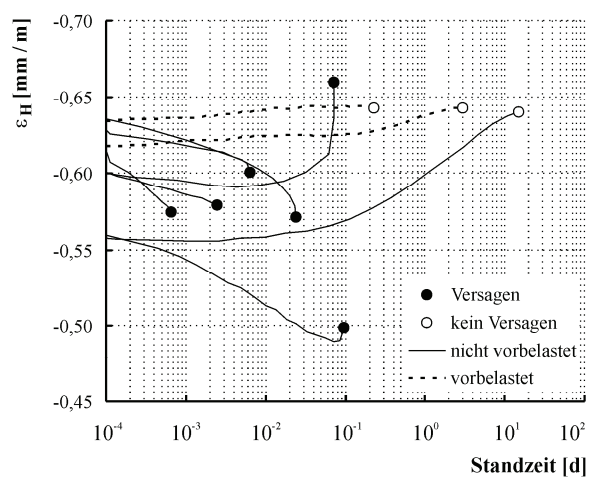
u) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 2



v) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung, Serie 2



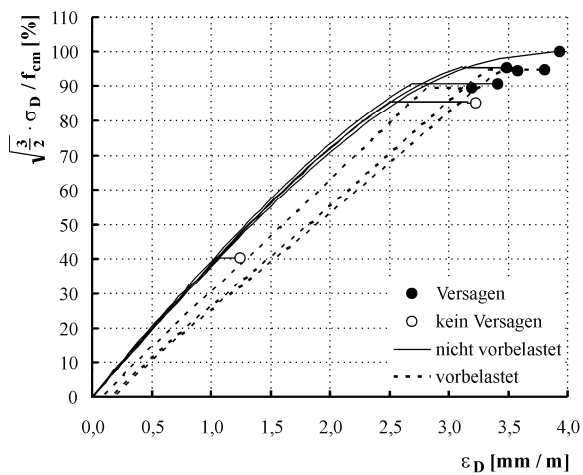
w) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3



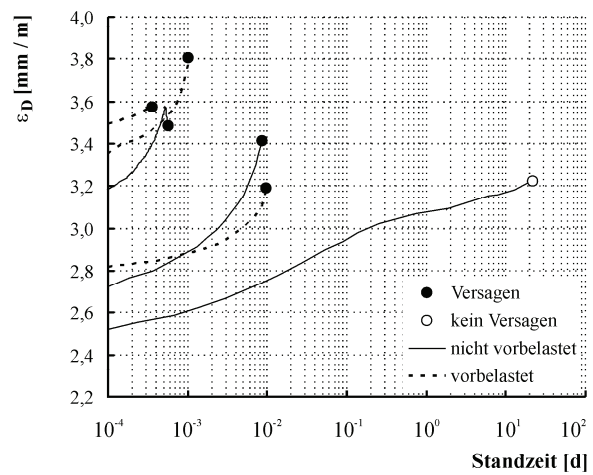
x) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung, Serie 3

Tafel 5.3: Versuchsergebnisse: ruhende Belastung

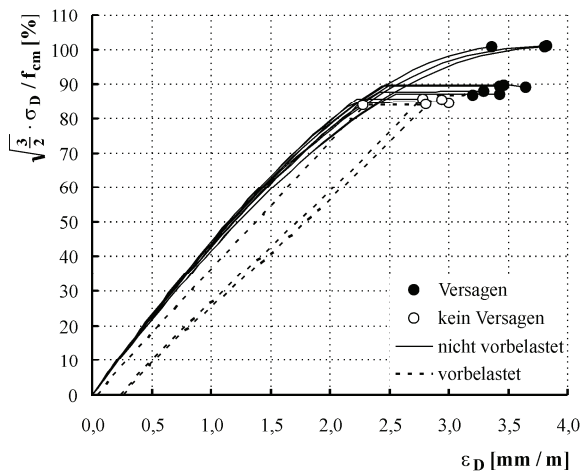
- Fortsetzung 4 -



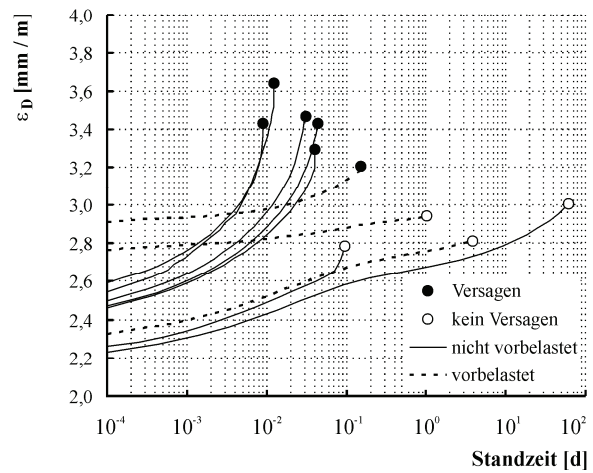
y) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



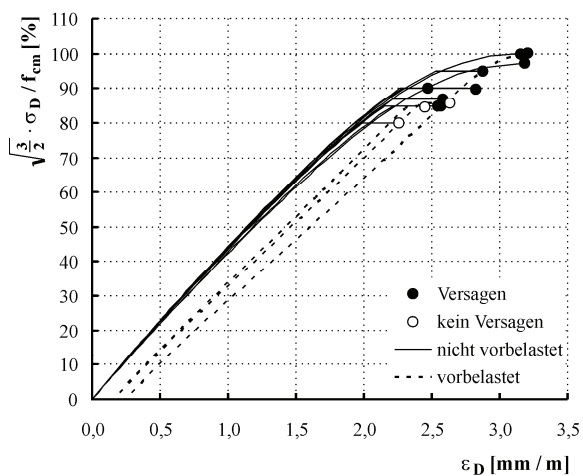
z) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung, Serie 1



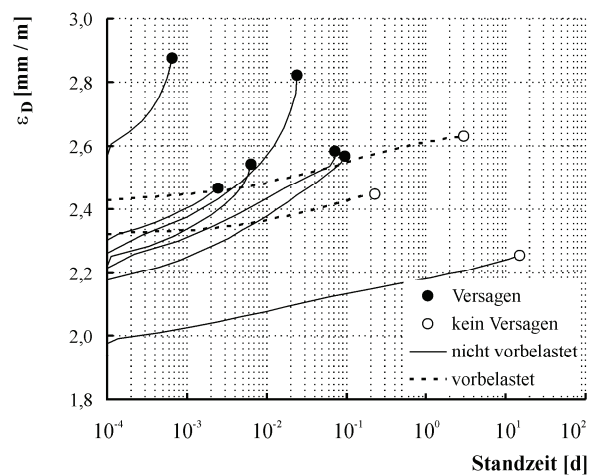
aa) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 2



ab) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung, Serie 2



ac) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3



ad) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung, Serie 3

5.2.4.3 Niederzyklisch gesteigerte Belastung

Die Auswertung der Versuche mit niederzyklischer, von Laststufe zu Laststufe erhöhter Belastung erfolgt zunächst unter dem Aspekt der Gesamtverformungen und zugehöriger Querdehnzahlen. Weitere Untersuchungen basieren auf der Zerlegung der Verformungen in reversible und irreversible Anteile und der Berechnung von Formänderungsenergieanteilen, die den entsprechenden Laststufen zugeordnet werden. Anschließend werden die zyklenspezifischen Steifigkeiten ausgewertet.

Einige Probekörper wurden höheren Beanspruchungen ausgesetzt, bevor die Belastung in regelmäßigen Lastschritten bis zum Versagen gesteigert wurde. Diese Beanspruchungen werden vereinfachend als *Vorbelastungen (VB)* bezeichnet.

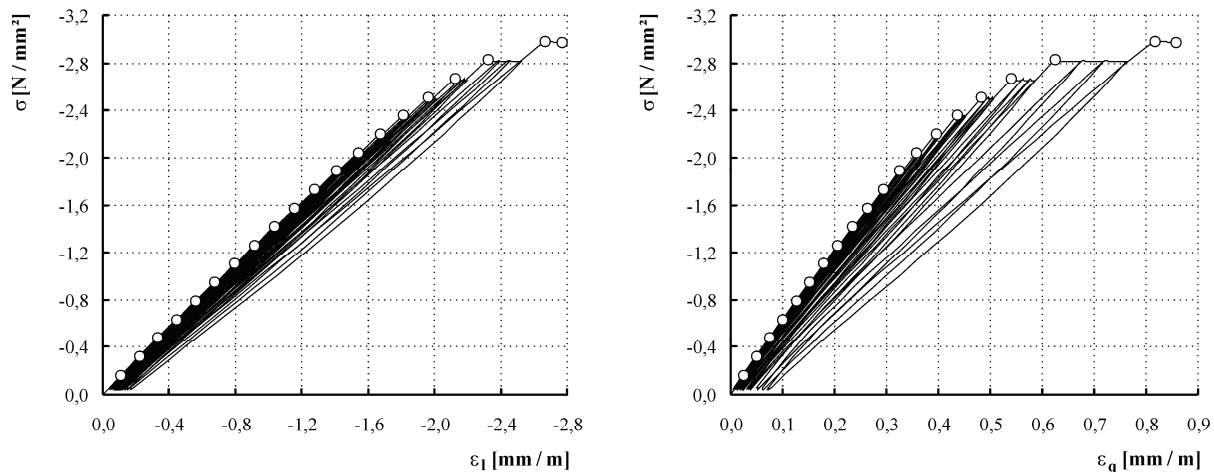
Die nachfolgenden Darlegungen beziehen sich auf das zyklenspezifische Materialverhalten während der Phasen ansteigender Belastung, wobei lediglich die Wertepaare dargestellt werden, die bei erstmaligem Erreichen der einzelnen Laststufen sowie zum Zeitpunkt des Versagens ermittelt wurden. In Abb. 5.8 wird die Vorgehensweise am Beispiel der am Probekörper 314 gemessenen Längs- und Querverformungen veranschaulicht. Die funktionellen Zusammenhänge für die einzelnen Probekörper sind im Anhang dargestellt.

Ergänzend sind in Tafel 5.4 und Tafel 5.5 die entsprechenden Funktionsverläufe angegeben, die im Rahmen der Standardversuche zur Ermittlung der Kurzzeitdruckfestigkeit ermittelt wurden. In den einzelnen Darstellungen ist zu erkennen, dass die im Rahmen der Vorbelastungen ermittelten Verformungswerte eine Sonderstellung einnehmen. Zu beachten ist, dass die Vorbelastungen mit deutlich höherer Geschwindigkeit aufgebracht wurden als die darauf folgenden Belastungen, siehe dazu Lastregime im Anhang.

Soweit die Probekörper nicht vorbelastet waren, stimmen die im zyklischen Versuch ermittelten Verformungen auf den niedrigen Laststufen nahezu mit den entsprechenden Verformungen überein, die bei monoton steigender Belastung ermittelt wurden, Tafel 5.4a-j. Bedingt durch strukturelle Änderungen, die sich z. B. in irreversiblen Verformungen und Steifigkeitsänderungen äußern, ergeben sich für größere Spannungen signifikante Abweichungen für die Verformungen. Gleiches gilt für das gesamte Verformungsverhalten entsprechend vorbelasteter Probekörper.

Höhere Beanspruchungen bewirken in Bezug auf die **Längsstauchungen**, **Querdehnungen**, **Querdehnzahlen** sowie die **Gestaltänderungen** eine Vergrößerung der Werte. Bei den **Volumenänderungen** zeigt sich, wie bereits zuvor festgestellt, für hohe Beanspruchungsintensitäten der Übergang zu einem qualitativ anderen Verhalten, welches von einer relativen Volumenvergrößerung gekennzeichnet ist, Tafel 5.4g, h. Es ist zu bemerken, dass aus diesen Abbildungen lediglich die Neigung zur Dilatanz, aber nicht die Beanspruchungsintensität, bei der das minimale Probekörpervolumen zu beobachten ist, abgeleitet werden kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in den Abbildungen lediglich die Werte bei Erreichen der Lastniveaus in den Primärzyklen aufgetragen sind und somit die Entwicklung der Verformungen in den Lasthaltephasen nicht zu erkennen ist.

Die Auswertungen zu den Versuchen mit überwiegend ruhender Belastung zeigen, dass irreversible Verformungen im Wesentlichen durch bleibende Längs- und Querverformungen sowie bleibende Gestaltänderungen in Erscheinung treten. Diese **bleibenden Verformungsanteile** wurden entspre-



a) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung

b) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung

Abb. 5.8: Spannungs-Dehnungs-Funktionen bei niederzyklisch gesteigerter Belastung, Probekörper 314, Serie 3

chend Abb. 5.2 von den Gesamtverformungen separiert und laststufenweise in Tafel 5.4k-p aufgetragen.

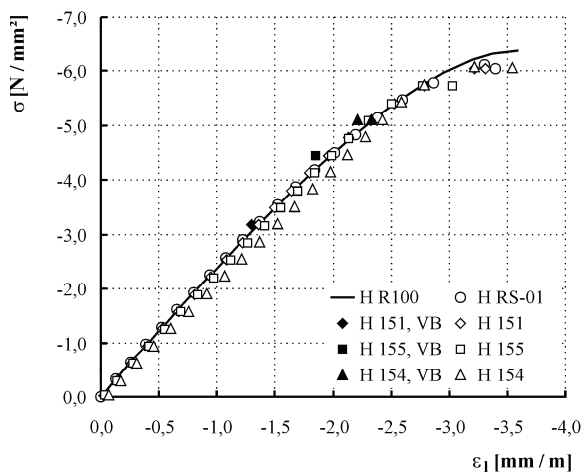
Die Größe der bleibenden Verformungsanteile richtet sich nach der Intensität und der Dauer der Beanspruchungen. Bereits Beanspruchungen vergleichsweise geringer Intensität führen zu messbaren bleibenden Verformungen. Durch höhere Vorbelastungen wird ein Teil der bleibenden Verformungen vorweggenommen. Für die darauf folgenden Belastungssituationen ergeben sich entsprechend moderatere Zuwächse an bleibenden Verformungen.

Aus den Spannungs-Dehnungs-Zusammenhängen wurde, wie in Abb. 2.4 definiert, die in jedem Einzelzyklus für irreversible Strukturänderungen **dissipierte Energie** D_S nach Gl. 2.57 berechnet, wobei für $D_{S,l}$ die *Längsverformungen* und für $D_{S,D}$ die *Gestaltänderungen* herangezogen wurden. In Tafel 5.4q-t sind diese Energieanteile kumuliert über die Lastgeschichte aufgetragen. Die nachfolgend dargelegten Beobachtungen gelten für beide Anteile, d. h. sowohl für $D_{S,l}$ als auch für $D_{S,D}$.

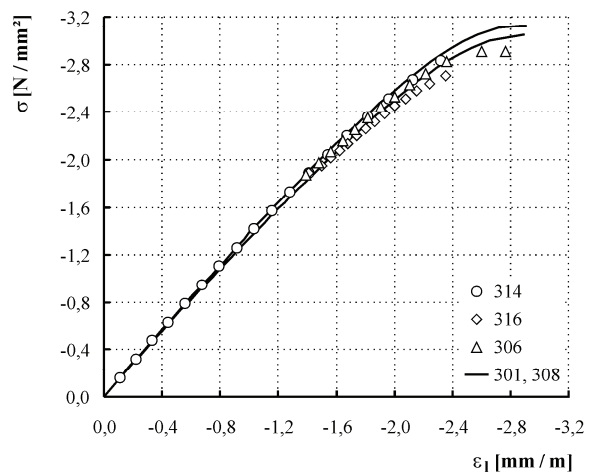
Bei Beanspruchungen bis etwa $0,4 f_{cm}$ sind die dissipativen Mechanismen für die Energiebilanz von untergeordneter Bedeutung, es wird nahezu keine Energie für irreversible Formänderungen umgewandelt. Für die Probekörper der Serie 1 stimmen die Energiebeträge bei der Laststufe von $0,85 f_{cm}$ in etwa überein, unabhängig von der Höhe und der Dauer der Vorbelastung. Diese Feststellung wird durch zwei Probekörper der Serie 3 bestätigt, bei denen die Energiebeträge bei vergleichbaren Beanspruchungsintensitäten unabhängig von der Lastgeschichte weitgehend übereinstimmen. Probekörper 316 bildet hier eine Ausnahme, wobei nicht geklärt werden kann, inwiefern die Differenzen auf Streuungen in den Materialeigenschaften oder Unregelmäßigkeiten bei der Verformungsmessung zurückzuführen sind.

Die Bedeutung der Lastgeschichte für die Größe der dissipierten Formänderungsenergie wird weiterhin durch Probekörper H 154 deutlich, Tafel 5.4q, s. Der Probekörper wurde in zwei Zyklen bei $0,80 f_{cm}$ vorbelastet. Der erste Vorbelastungszyklus lieferte den größeren Anteil an dissipierter Formänderungsenergie, obwohl in diesem die Belastungsdauer mit 16 Minuten deutlich kürzer war als im zweiten Vorbelastungszyklus (120 Minuten). Ein großer Teil der strukturellen Änderungen, die als

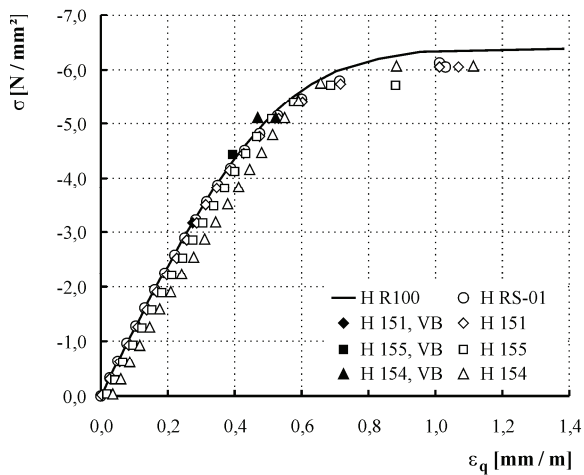
Tafel 5.4: Versuchsergebnisse: niederzyklisch gesteigerte Belastung



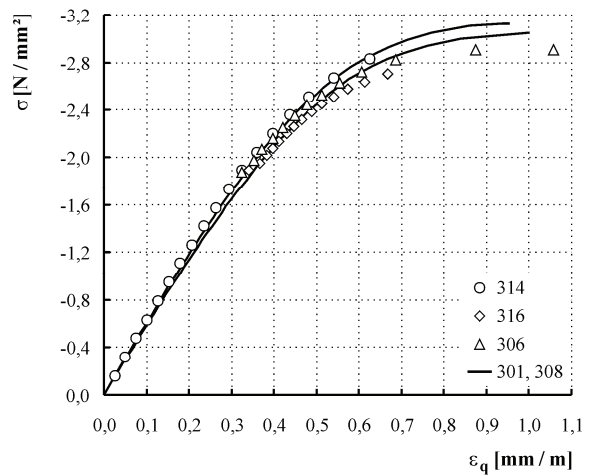
a) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 1



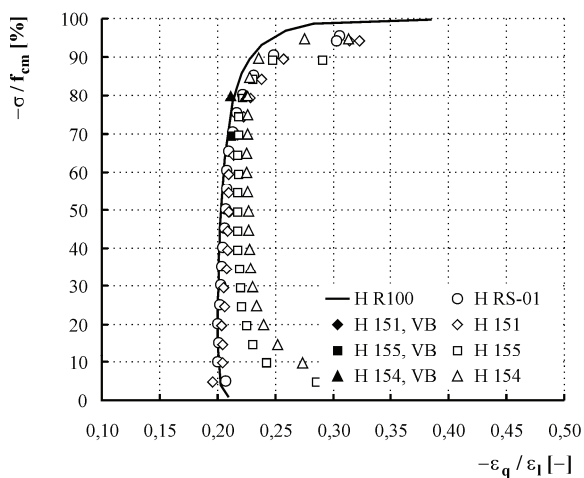
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 3



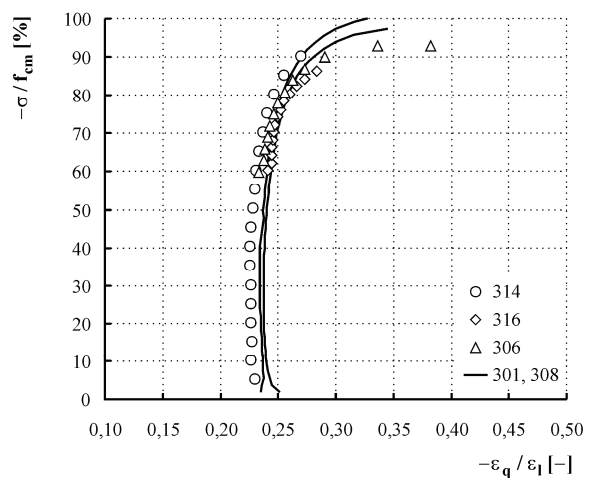
c) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 1



d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Serie 3



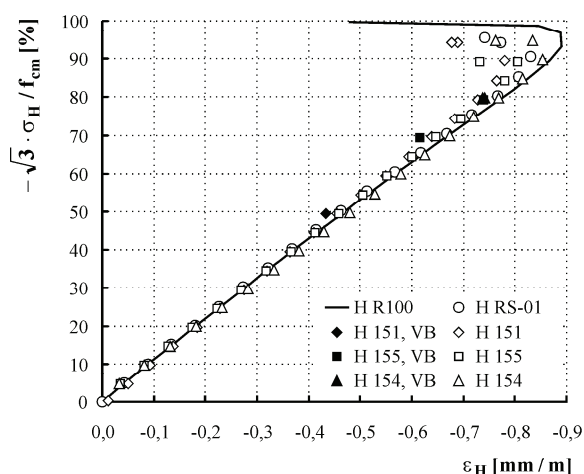
e) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



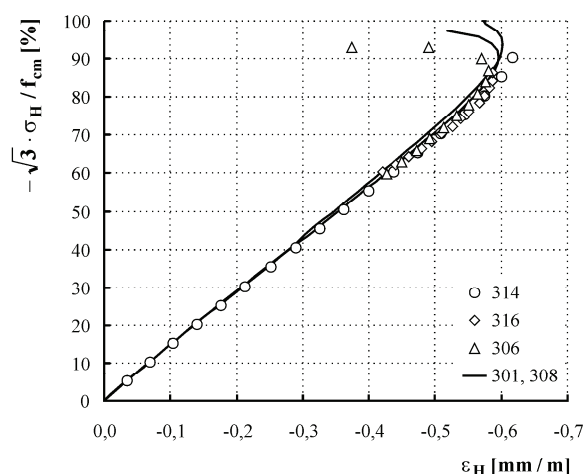
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3

Tafel 5.4: Versuchsergebnisse: niederzyklisch gesteigerte Belastung

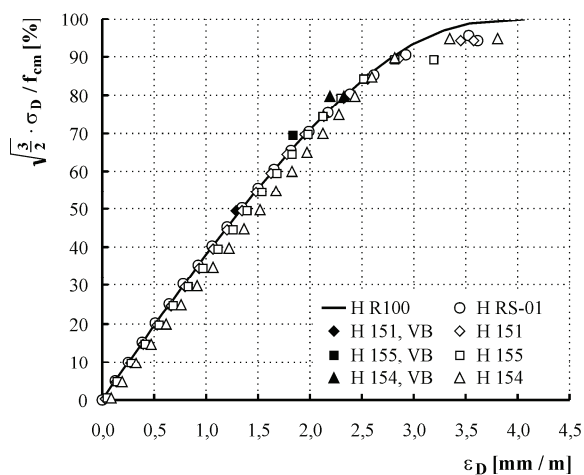
- Fortsetzung 1 -



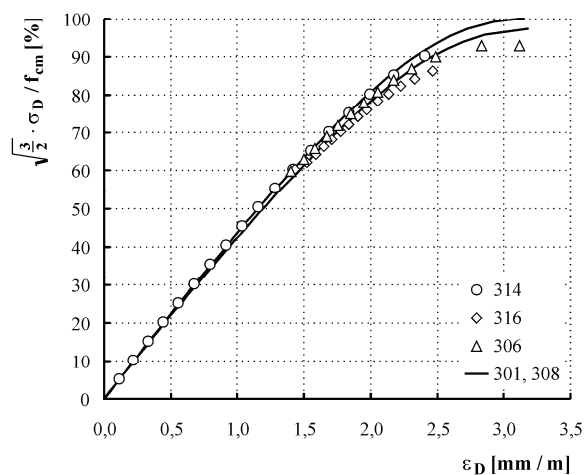
g) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



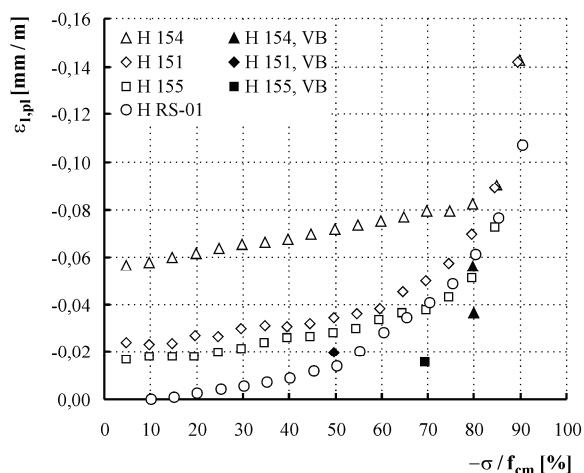
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3



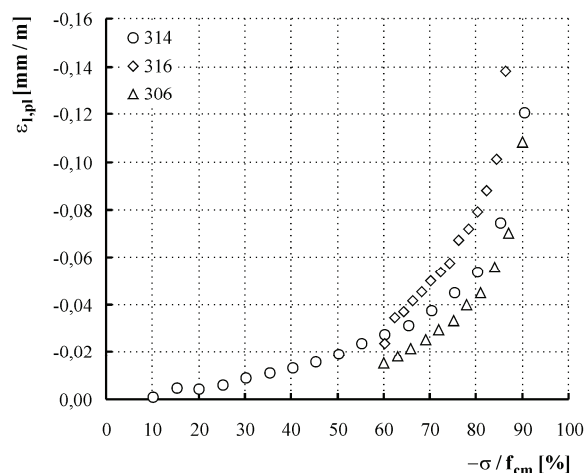
i) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3



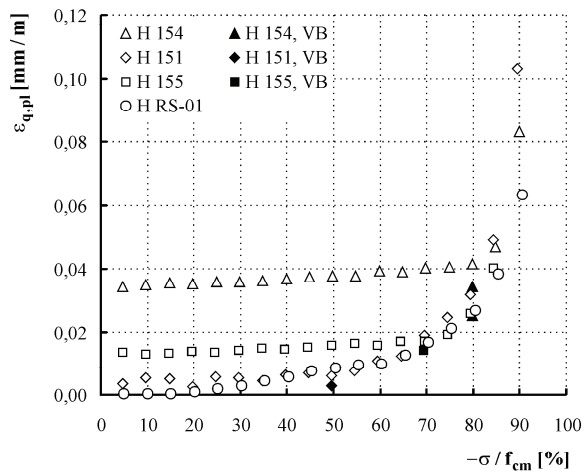
k) bleibende Längsdehnung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



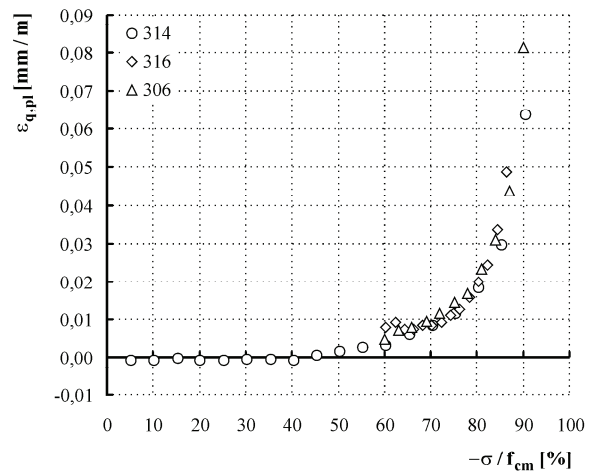
l) bleibende Längsdehnung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3

Tafel 5.4: Versuchsergebnisse: niederzyklisch gesteigerte Belastung

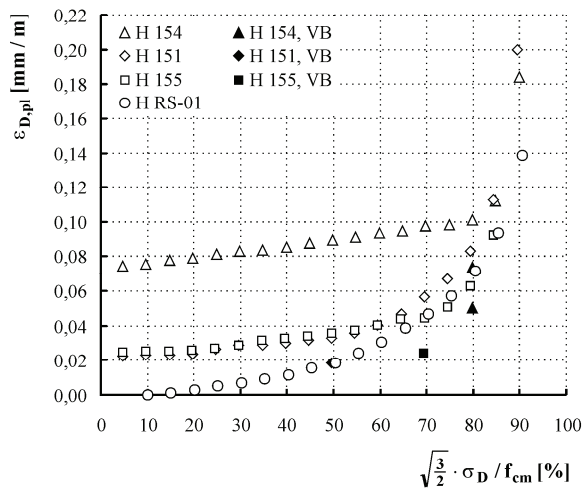
- Fortsetzung 2 -



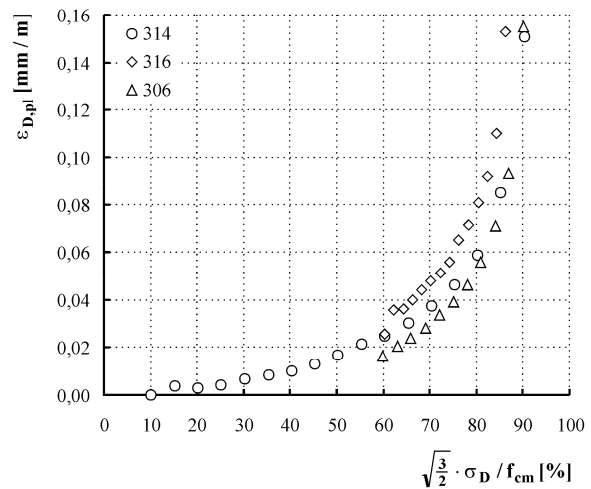
m) bleibende Querdehnung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



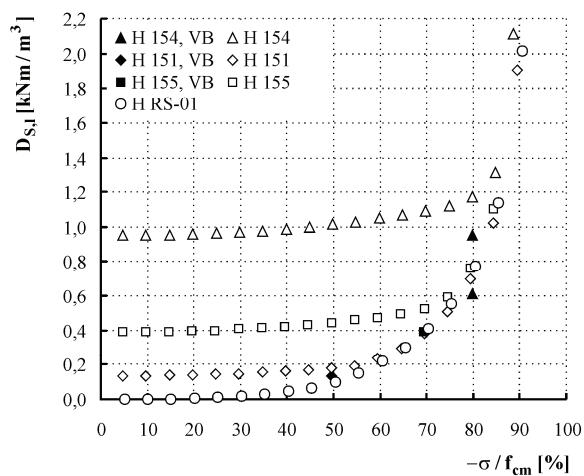
n) bleibende Querdehnung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3



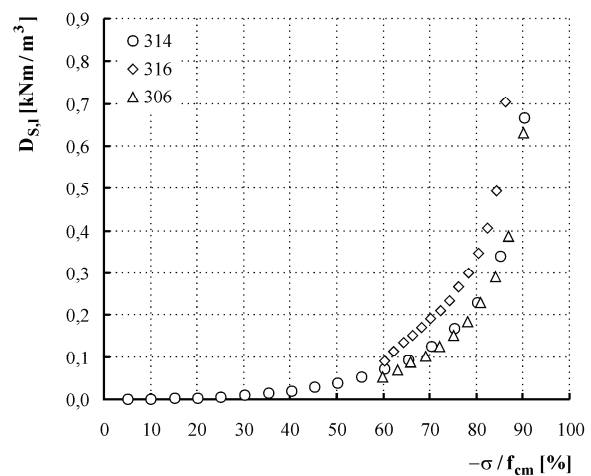
o) bleibende Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



p) bleibende Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3



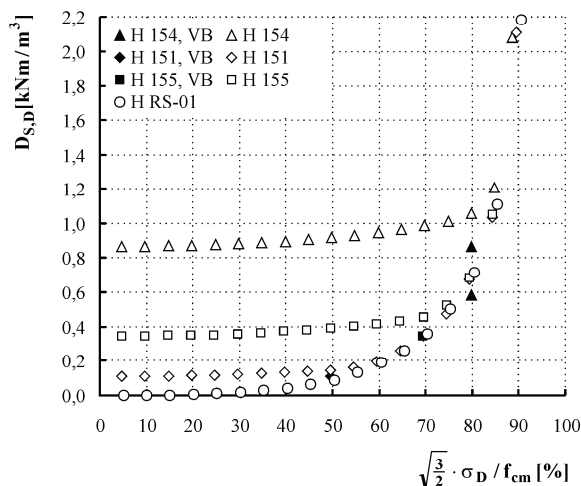
q) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



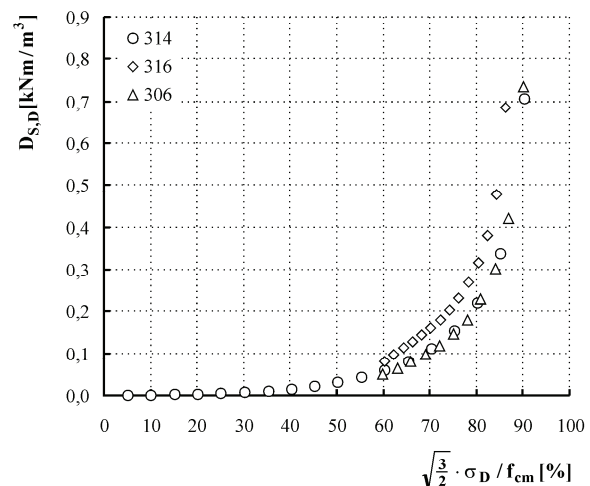
r) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3

Tafel 5.4: Versuchsergebnisse: niederzyklisch gesteigerte Belastung

- Fortsetzung 3 -



s) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 1



t) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Serie 3

plastische Verformungen und Änderungen der elastischen Eigenschaften in Erscheinung treten, vollzieht sich folglich innerhalb einer vergleichsweise kurzen Zeitdauer. Dies wird als Ursache dafür angesehen, dass für alle Probekörper auf vergleichbaren Lastniveaus unabhängig von der Lastgeschichte nahezu identische Werte für die dissipierte Gestaltänderungsenergie ermittelt werden können.

Der **statische Elastizitätsmodul** wurde ohne höhere Vorbelastung an je einem Probekörper der Serie 1 und 3 experimentell bestimmt, wobei die Messwerte der 7. Laststufe, bei der die Druckspannung 35 % der Kurzzeitdruckfestigkeit erreichte, zugrunde gelegt wurden. Für die Berechnung des statischen Elastizitätsmoduls wurden in Anlehnung an DIN EN 1352 (1997) die Messdaten genutzt, die unmittelbar vor Ansteigen der Belastung sowie die Wertepaare, die 30 s nach Erreichen der vorgesehenen Belastung von $-0,35 f_{cm}$ gemessen wurden. In Abb. 5.9 sind die relevanten Zeitpunkte der Messdatenerfassung hervorgehoben.

Die ermittelten Spannungen und Längsdehnungen sowie die daraus berechneten statischen Elastizitätsmoduln sind in Tabelle 5.7 zyklensweise zusammengestellt. Aus den Werten geht hervor, dass der statische Elastizitätsmodul von Zyklus zu Zyklus geringfügig abgenommen hat. Entsprechend DIN EN 1352 (1997) wird der Elastizitätsmodul auf 100 N/mm^2 gerundet und ergibt für den Porenbeton von Serie 1 und 3 $E = 2400 \text{ N/mm}^2$ bzw. $E = 1400 \text{ N/mm}^2$. Der nach DIN 4223 (2003) ohne experimentellen Nachweis zu veranschlagende statische Elastizitätsmodul beträgt für die untersuchten Rohdichteklassen $E = 2250 \text{ N/mm}^2$ bzw. $E = 1250 \text{ N/mm}^2$ und ist damit etwas kleiner als der jeweils experimentell bestimmte Wert.

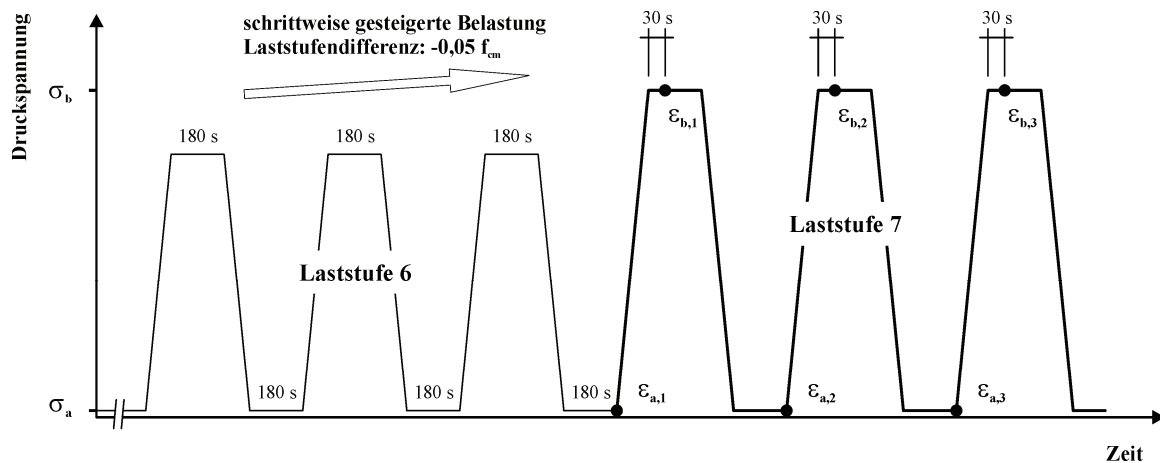


Abb. 5.9: Auszug aus dem Lastregime, Zeitpunkte der Messdatenerfassung

Tab. 5.7: Spannungen, Längsdehnungen, statischer Elastizitätsmodul bei schrittweise gesteigerter Belastung, Laststufe 7

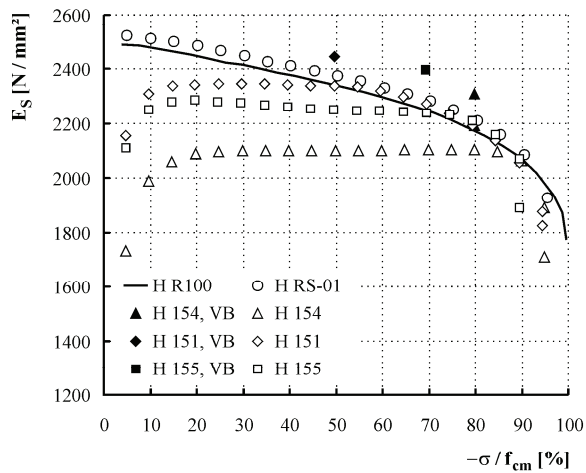
Probekörper		H RS-01 (Serie 1)			314 (Serie 3)		
		1. Zyklus	2. Zyklus	3. Zyklus	1. Zyklus	2. Zyklus	3. Zyklus
σ_a	[N/mm ²]	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06
σ_b	[N/mm ²]	-2,26	-2,26	-2,26	-1,10	-1,10	-1,10
ε_a	[mm/m]	-0,031	-0,032	-0,032	-0,050	-0,050	-0,052
ε_b	[mm/m]	-0,938	-0,942	-0,944	-0,794	-0,795	-0,797
E-Modul	[N/mm ²]	2422	2415	2411	1398	1394	1392

Mit Hinblick auf **Strukturänderungen** sind neben den plastischen Verformungen die Änderungen der Steifigkeit ein besonderer Indikator. In Tafel 5.5a-f sind die *Sekantenmoduln* dargestellt, die den Verformungswerten von Tafel 5.4 zugeordnet sind. Aus den Abbildungen geht hervor, dass die Steifigkeiten beanspruchungsabhängigen Änderungen unterliegen, der Einfluss der Lastgeschichte aber gering ist, solange niedrige Belastungen aufgebracht werden. Im Bereich niedriger Beanspruchungsintensitäten stimmen die Steifigkeiten, die im Versuch mit monoton bzw. niederzyklisch gesteigerter Belastung ermittelt wurden, nahezu überein.

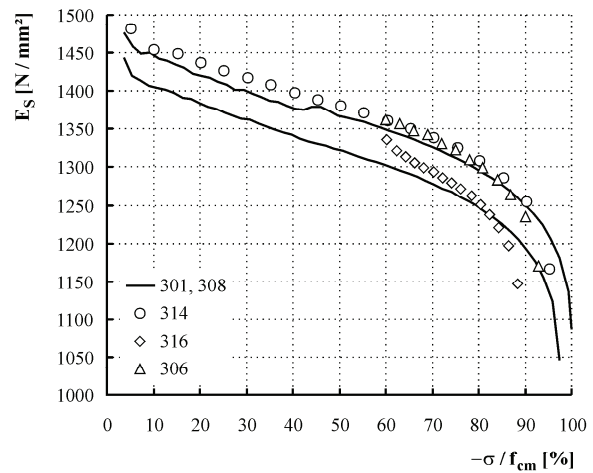
Entsprechend hohe Belastungen wirken sich auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten bei allen nachfolgenden Beanspruchungssituationen aus. Das Maß der Beeinflussung richtet sich nach Höhe und Dauer der Beanspruchung. Vergleichsweise kurzzeitige Belastungen, deren Intensität etwa 50 % der Kurzzeitdruckfestigkeit beträgt, bewirken bereits spürbare Modifikationen des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens, Tafel 5.5a, c, e. Der dadurch herbeigeführte Steifigkeitszustand bleibt bei allen nachfolgenden Beanspruchungssituationen mit vergleichsweise kurzer Dauer nahezu unverändert erhalten, solange die Beanspruchungsintensität der Vorbelastung nicht überschritten wird.

Für höhere Belastungsgrade ergeben sich unmittelbar bei Überschreiten der vorangegangenen größten Beanspruchungsintensität Änderungen im Spannungs-Dehnungs-Verhalten, wie anhand der Anstiege der Spannungs-Dehnungs-Funktionen deutlich erkennbar ist. In Tafel 5.5g-l sind beispielhaft für zwei

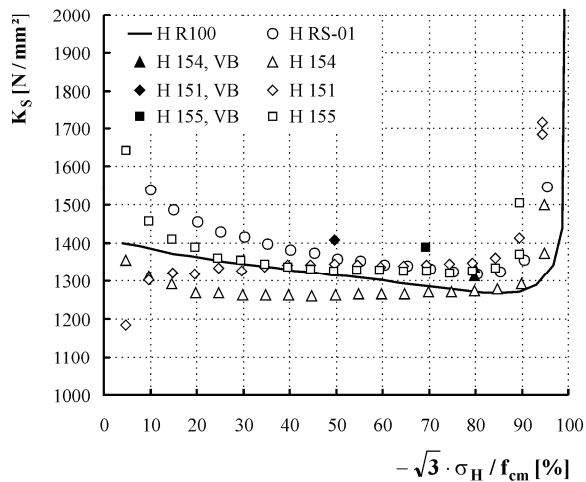
Tafel 5.5: Versuchsergebnisse: zyklenspezifische Steifigkeiten



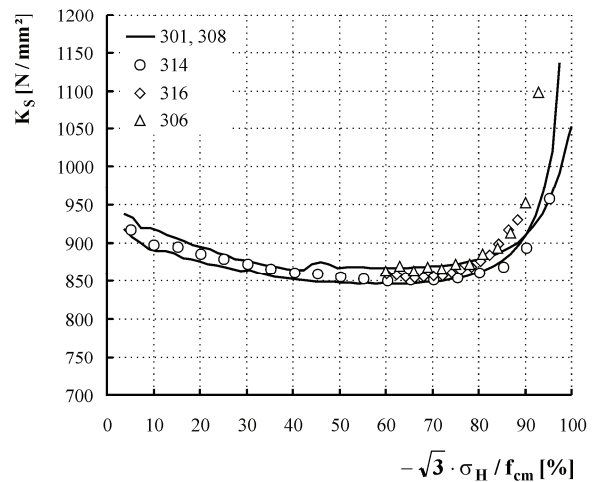
a) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Primärzyklen, Serie 1



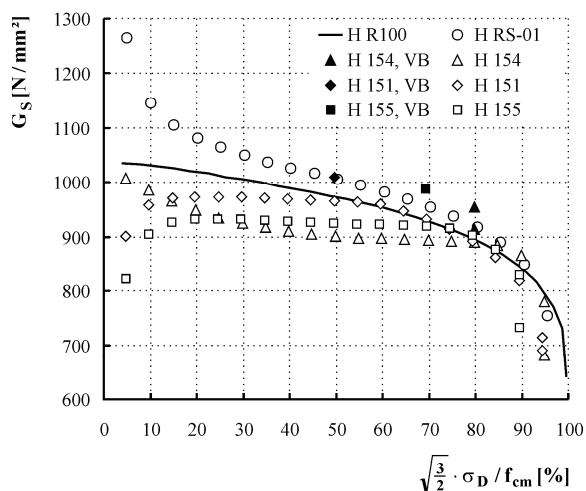
b) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Primärzyklen, Serie 3



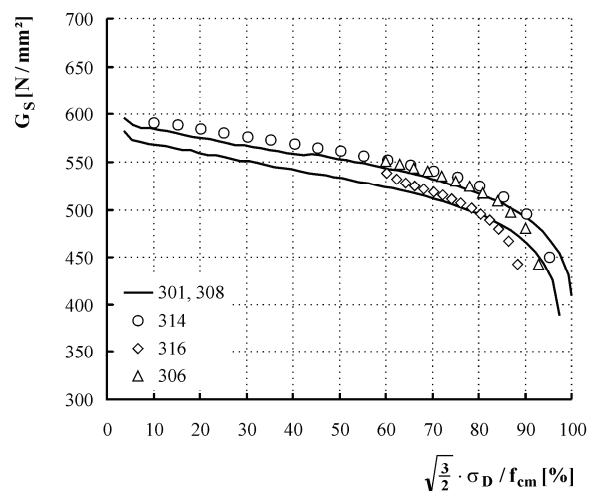
c) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Primärzyklen, Serie 1



d) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Primärzyklen, Serie 3



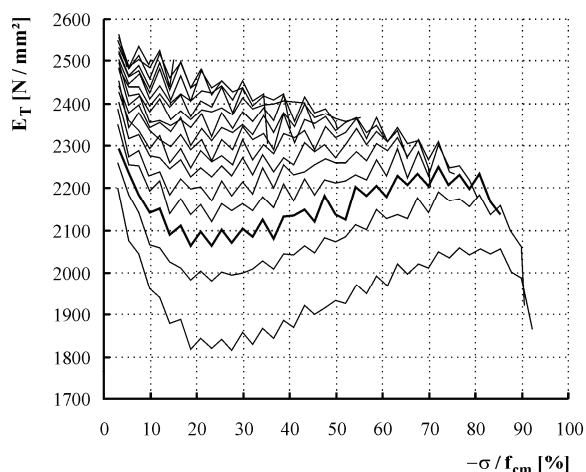
e) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Primärzyklen, Serie 1



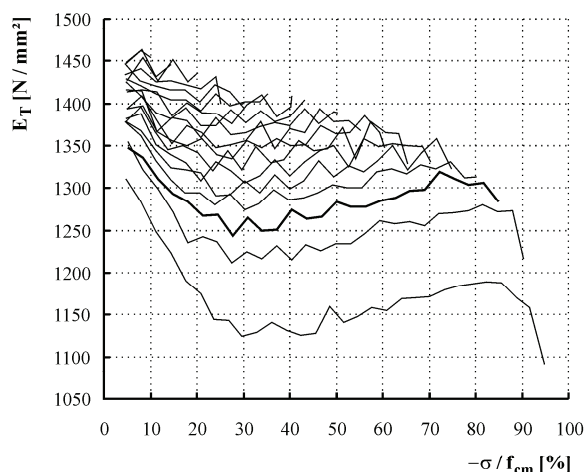
f) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Primärzyklen, Serie 3

Tafel 5.5: Versuchsergebnisse: zyklenspezifische Steifigkeiten

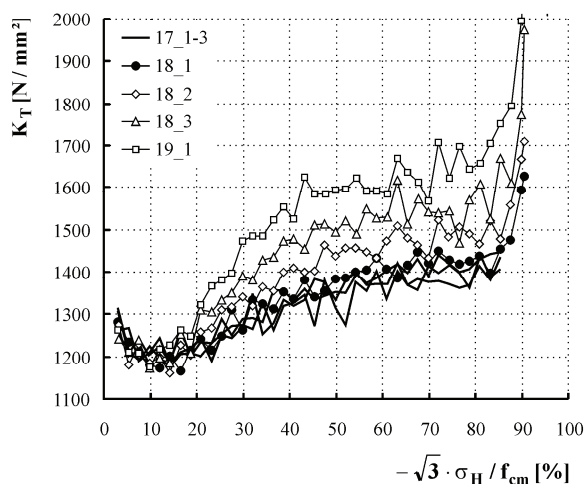
- Fortsetzung 1 -



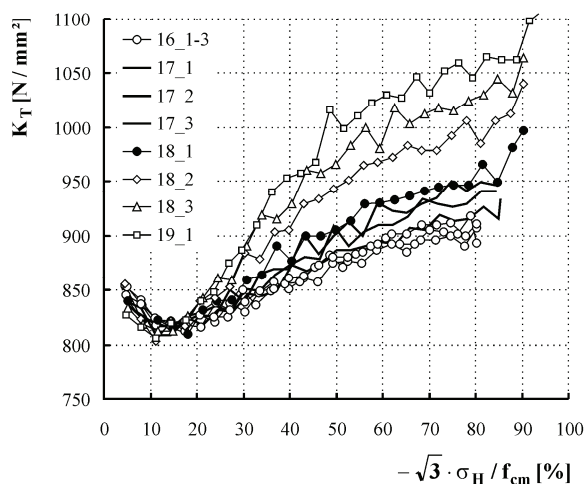
g) Elastizitätsmodul (Tangentenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade der Primärzyklen, Probekörper H RS-01, Serie 1



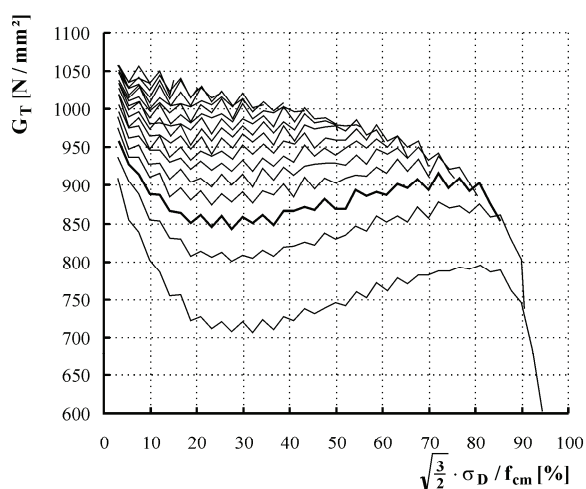
h) Elastizitätsmodul (Tangentenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade der Primärzyklen, Probekörper 314, Serie 3



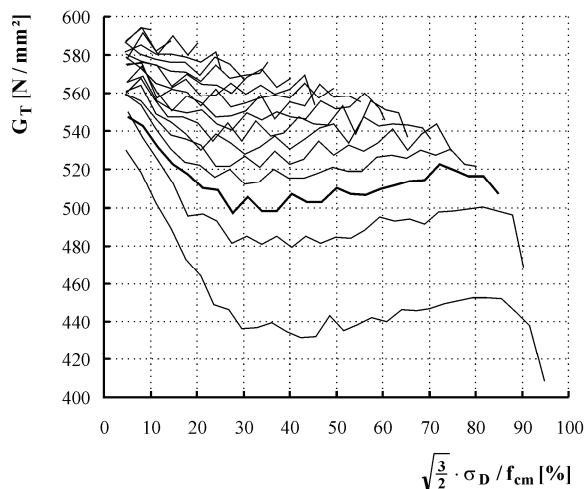
i) Kompressionsmodul (Tangentenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade ausgewählter Zyklen, Probekörper H RS-01, Serie 1



j) Kompressionsmodul (Tangentenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade ausgewählter Zyklen, Probekörper 314, Serie 3



k) Gleitmodul (Tangentenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade der Primärzyklen, Probekörper H RS-01, Serie 1



l) Gleitmodul (Tangentenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade der Primärzyklen, Probekörper 314, Serie 3

Probekörper die *Tangentenmoduln* für einzelne Belastungspfade aufgetragen. Ausgewählt wurden für die Elastizitäts- und Gleitmoduln die Belastungspfade der Primärzyklen sowie für die Kompressionsmoduln die Belastungspfade der letzten Zyklen vor Eintreten des Probekörperversagens. In der Legende sind die Nummern für Laststufe und Zyklus vermerkt, z. B. entspricht 17_1 dem ersten Zyklus auf Laststufe 17. Die Zyklen, in denen die Beanspruchungsintensität von $0,85 f_{cm}$ zum ersten Mal erreicht wurde, sind entsprechend hervorgehoben.

Anhand der Funktionen für den **Elastizitätsmodul** sowie für den **Gleitmodul** ist erkennbar, dass die durch Strukturänderungen herbeigeführten Steifigkeitsdegradationen sukzessive voranschreiten, Tafel 5.5g, h, k, l. Vorbelastungen wirken sich, unabhängig von deren Intensität, auf den gesamten Funktionsverlauf zugehöriger Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge aus. Die dargestellten Funktionen zeigen, dass sich die Krümmung der zugehörigen Spannungs-Dehnungs-Funktionen für die Zyklen höherer Beanspruchungsintensität mehrfach ändert.

Tafel 5.5i und j zeigen die funktionellen Zusammenhänge für den **Kompressionsmodul** (Tangentenmodul) aufeinanderfolgender Zyklen mit steigender Beanspruchung. Die Zyklen mit niedrigen Beanspruchungsintensitäten konnten in den Abbildungen nicht berücksichtigt werden. Die Funktionen liegen nahezu deckungsgleich übereinander, solange die Beanspruchungen einen materialabhängigen Grenzwert nicht überschreiten. Für Probekörper H RS-01 ergeben sich auf Laststufe 17, für Probekörper 314 auf Laststufe 16 in Bezug auf die Kompressionssteifigkeit für alle Zyklen nahezu unveränderte Verhältnisse. Beanspruchungen, deren Intensitäten etwa 85 % der Kurzzeitdruckfestigkeit übersteigen, führen zu grundsätzlichen Änderungen im gesamten Funktionsverlauf für den Kompressionsmodul und somit auch für das sphärische Spannungs-Dehnungs-Verhalten.

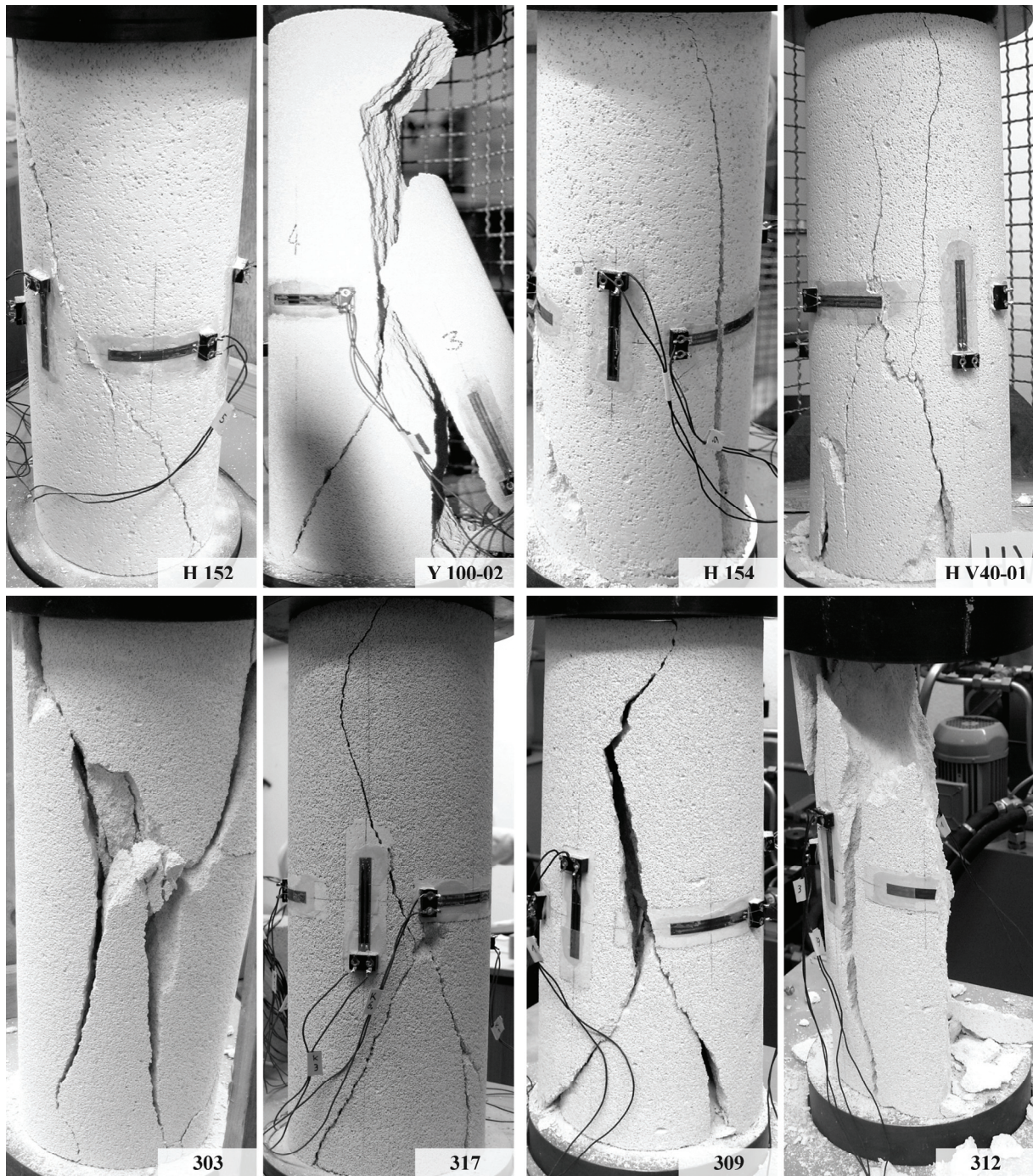
Die Beanspruchungsintensität, bei der sich maßgebliche Änderungen des Kompressionsmoduls ergeben, stimmt mit der experimentell ermittelten Dauerstandfestigkeit des Porenbetons überein. Für die Bewertung der Dauerstandfestigkeit haben Untersuchungen zur Kompressionssteifigkeit folglich eine besondere Bedeutung.

5.2.5 Bruchbilder

Das Versagen der Probekörper trat durch makroskopische Trennung des Gefüges ein, es war von einem deutlich hörbaren Geräusch und einem schlagartigen Abfall der Pressenkraft begleitet. Abgesehen von der Zunahme der Verformungsgeschwindigkeiten für die Längs- und Querverformungen kündigte sich das Versagen der Probekörper nicht an. Vor dem Versagen konnten weder mit bloßem Auge erkennbare Risse an der Oberfläche, noch hörbare Geräuschemissionen festgestellt werden.

In Abb. 5.10 sind Bruchbilder beispielhaft dargestellt. Die oberen Abbildungen zeigen Probekörper der Serien 1 und 2, die unteren Abbildungen Probekörper der Serie 3. Ferner wurde danach unterschieden, ob das Versagen in der Phase steigender Beanspruchung bzw. konstanter Belastung aufgetreten ist, Abb. 5.10a, b. Probekörper H 152 wurde weggeregelt, die Probekörper Y 100-02, 303 und 317 kraftgeregelt zu Bruch gefahren.

Alle Bruchbilder stimmen grundsätzlich darin überein, dass sich in entsprechendem Abstand von den Probekörperendflächen die Risse überwiegend längs, d. h. in Richtung der äußeren Druckbelastung,



a) Probekörperversagen bei steigender Beanspruchung

b) Probekörperversagen in der Lasthaltephase

Abb. 5.10: Bruchbilder

ausgerichtet haben. In der Nähe der Endflächen ergaben sich häufig zur Längsachse geneigte Risse. Die Tendenz zur sogenannten Druckpyramiden- bzw. Druckkegelbildung, die auch für andere Betonarten typisch ist, zeichnet sich ab.

Unterschiedliche Lastregime haben keinen erkennbaren Einfluss auf die Ausrichtung der Risse und die Bruchbilder. Für alle drei Versuchsserien sind die Längsrisse dominant, unabhängig davon, ob die Beanspruchung zügig oder langsam gesteigert wurde oder das Versagen in der Lasthaltephase eintrat.

5.3 Interpretation der Versuchsergebnisse

5.3.1 Schwindverhalten

Das Schwinden der Probekörper vollzog sich im Wesentlichen in der Phase der Abgabe des überschüssigen Wassers an die Umgebungsluft. Zu Beginn der experimentellen Untersuchungen zum Tragverhalten war ein nahezu ausgeglichener Zustand bezüglich des Schwindens erreicht, vgl. Abb. 5.4c. Die Beträge der gemessenen Endwerte der Schwindverformungen fallen mit 0,10 mm/m bzw. 0,15 mm/m geringer als der in DIN 4223 (2003) angegebene Wert für das Endschwindmaß ($\varepsilon_{S,\infty} = 0,25$ mm/m) aus, wobei zu bemerken ist, dass nicht unmittelbar im Anschluss an die Autoklavierung mit den Schwindmessungen begonnen wurde.

Eine Besonderheit in Bezug auf das Schwinden der untersuchten Porenbetonprobekörper stellt der Umstand dar, dass trotz erheblicher Wasserabgabe zu Beginn der Einlagerungsphase im Ergebnis eine Volumenzunahme der Probekörper ermittelt wurde. Entsprechend der gesichteten Literatur [z. B. Schubert 1983, Nielsen 1983, Houst et al. 1983, Aroni et al. 1993, Hauser et al. 1999, Narayanan & Ramamurthy 1999, 2000, Ostrat & Juurvee 2003] wurde mit einer trocknungsbedingten Kontraktion des Gefüges gerechnet. Lediglich aus den Ergebnissen von Daschner & Zilch (2001) lässt sich eine Neigung zum Quellen ableiten.

Die erwartete Volumenkontraktion bei Feuchtigkeitsabgabe und Volumenexpansion bei Feuchtigkeitsaufnahme wurde erst in einem fortgeschrittenen Stadium festgestellt, Abb. 5.4c. In dieser Phase zogen Schwankungen der relativen Luftfeuchte signifikante Formänderungen nach sich, wenngleich sich die Probekörpermasse, die unmittelbar über den Feuchtegehalt des Porenbetons Auskunft gibt, nur marginal änderte. Diese Beobachtungen lassen sich dahingehend interpretieren, dass die gemessenen Schwindverformungen das Resultat mindestens *zweier Prozesse* darstellen, die in Bezug auf das Probekörpervolumen eine entgegengesetzte Wirkung haben können.

Bei den nachfolgenden **Modellüberlegungen** wird von abschnittsweise konstanten klimatischen Verhältnissen ausgegangen, Abb. 5.11. Der Zeitpunkt t_0 stellt einen Zeitpunkt unmittelbar nach der Autoklavierung dar, wobei die Probekörper bereits auf etwa 20 °C abgekühlt sind und einen entsprechenden Überschuss an chemisch nicht gebundenem Wasser aufweisen.

Entsprechend den Modellvorstellungen bewirkt ein *Prozess 1* ein Quellen der Probekörper, das unter konstanten klimatischen Verhältnissen einem Endzustand entgegenstrebt, Abb. 5.11a. Inwiefern dieser Prozess von Änderungen der Umgebungsbedingungen beeinflusst wird, lässt sich anhand der durchgeführten Messungen nicht beurteilen.

Diesem Prozess ist ein *Prozess 2* überlagert, der unmittelbar mit dem Feuchtegehalt der Probekörper korrespondiert. Vereinfachend wird affines Verhalten vorausgesetzt, Abb. 5.11a. Dieser zweite Prozess ist dadurch gekennzeichnet, dass die Feuchtigkeitsabgabe zu Kontraktions- und die Feuchtigkeitsaufnahme zu Expansionserscheinungen führt. Je nachdem, welcher Prozess dominiert, wird im Ergebnis eine Volumenzunahme bzw. Volumenabnahme beobachtet.

Bei einem zweiten, in seinen Eigenschaften identischen Probekörper erfolgt die Feuchtigkeitsabgabe in zwei Etappen, was durch ein Absenken der relativen Luftfeuchte zum Zeitpunkt t_I realisiert wird, Abb. 5.11b. Das durch Prozess 1 herbeigeführte Quellen ist zu diesem Zeitpunkt bereits nahezu zum

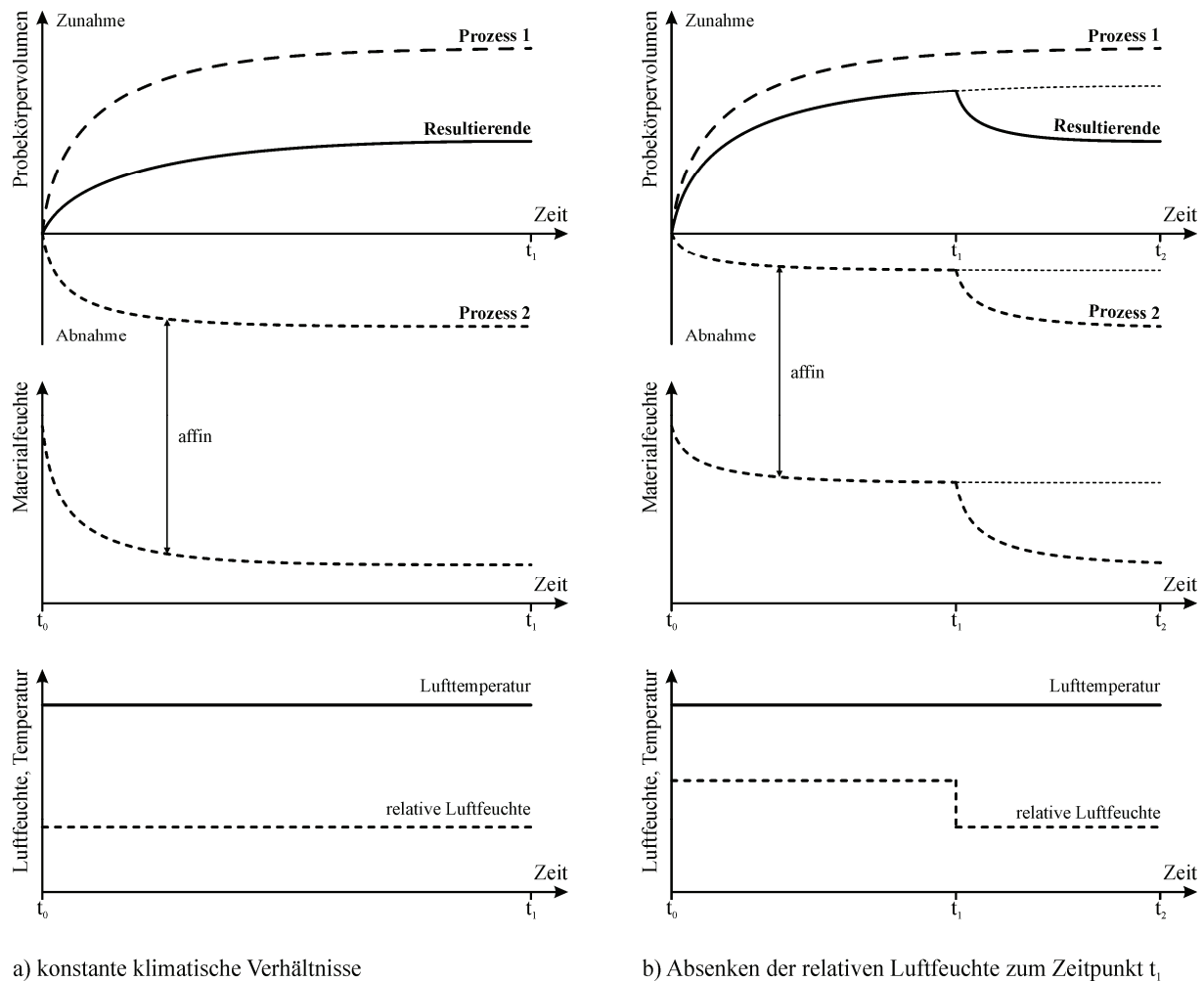


Abb. 5.11: Modellvorstellungen zu lastunabhängigen Formänderungen von Porenbeton nach der Autoklavierung in Abhängigkeit von den klimatischen Verhältnissen

Erliegen gekommen, sodass die weiteren Volumenänderungen von Prozess 2 dominiert werden. Folglich ist der Zeitraum $[t_2 - t_1]$ von einem abnehmenden Volumen gekennzeichnet.

Dieses Phänomen war bei den experimentellen Untersuchungen nach Ausfall der Klimaanlage zu beobachten, Abb. 5.4c. Zyklische Wechsel der Luftfeuchtigkeit waren von entsprechenden Volumenänderungen begleitet. Bei den experimentell untersuchten Probekörpern hat die Quellwirkung von Prozess 1 unter den gegebenen Laborbedingungen das größere Potential aufgewiesen. Diese Tendenz lässt sich grundsätzlich auch aus den Messergebnissen von Daschner & Zilch (2001) ableiten.

Da Prozess 1 nicht unmittelbar auf die klimatischen Verhältnisse, d. h. Temperatur und relative Luftfeuchte zurückgeführt werden kann, ist anzunehmen, dass dieser Prozess seine Ursachen in chemischen Reaktionen hat. Damit muss unterstellt werden, dass die Strukturbildung des Porenbetons entgegen den allgemeinen Annahmen, z. B. [Narayanan & Ramamurthy 1999, Grübl et al. 2001], nicht unmittelbar nach der Autoklavierung abgeschlossen ist. Es bleibt zu untersuchen, welchen Einfluss diese Reaktionen, die beim untersuchten Porenbeton im Alter von etwa 15 Monaten weitgehend abgeschlossen waren, auf das Tragverhalten des Porenbetons haben. In diesem Zusammenhang ist zu be-

achten, dass sich Änderungen des Feuchtegehalts des Porenbetons zusätzlich auf den Materialwiderstand auswirken, Abb. 3.3b.

In Bezug auf die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Untersuchungen zum Tragverhalten wird davon ausgegangen, dass diese Prozesse zum Erliegen gekommen sind, da zu Versuchsbeginn keine zusätzlichen schwindbedingten Formänderungen mehr feststellbar waren. Der infolge Schwindens herbeigeführte Zustand wurde für alle weiteren Untersuchungen als Ausgangszustand herangezogen, die schwindbedingten Vorverformungen wurden vernachlässigt.

5.3.2 Tragverhalten

5.3.2.1 Dauerstandfestigkeit

Es werden zwei elementare Phasen des Tragverhaltens unterschieden: *stabiles* und *instabiles* Tragverhalten. Mit Hilfe der Dauerstandfestigkeit wird eine spannungsbasierte Abgrenzung dieser beiden Phasen vorgenommen. Druckspannungen, die diese Grenze nicht überschreiten, werden der stabilen Phase zugeordnet, sie können für unbegrenzte Zeitdauer vom Material ertragen werden. Die mit diesen Beanspruchungen einhergehenden Strukturänderungen streben asymptotisch einem stabilen Endzustand entgegen.

Die instabile Phase des Tragverhaltens ist dadurch gekennzeichnet, dass Strukturänderungen ohne weitere Erhöhung der Druckspannung voranschreiten und zeitabhängig zum Versagen führen. Folglich kann diese Phase in Anlehnung an [Freudenthal 1955, Smadi & Slate 1989, Streit 1991] als beginnender bzw. voranschreitender Bruch aufgefasst werden, der von Rissprozessen dominiert wird.

Als maßgebliche Grenze für die Tragfähigkeit wird zur Beurteilung der stabilen Phase des Tragverhaltens die *Dauerstandfestigkeit* angesehen. Auf der Basis der in den Versuchen erreichten Standzeiten und nach Anpassung der Parameter des vorgeschlagenen hyperbolischen Ansatzes nach Gl. 5.7 wurden die Dauerstandfestigkeiten der untersuchten Serien ermittelt. Für Porenbeton der Serien 1, 2 und 3 ergeben sich entsprechend den Gleichungen 5.10 und 5.11 Dauerstandfestigkeiten von 5,70 N/mm², 4,88 N/mm² bzw. 2,70 N/mm². Diese Werte stimmen weitgehend mit den Festlegungen nach DIN 4223 (2003) überein, wonach die Dauerstandfestigkeit von Porenbeton etwa 85% der Kurzzeitdruckfestigkeit beträgt.

Die Ergebnisse von Wittmann & Zaitsev (1974), nach denen bei Porenbeton mit einem Festigkeitszuwachs unter ruhenden Dauerlasten zu rechnen ist, können mit den eigenen Ergebnissen nicht bestätigt werden. Vielmehr ist davon auszugehen, dass der Einfluss von vorangegangenen vorwiegend ruhenden *Belastungszuständen* auf den Materialwiderstand vernachlässigt werden kann, wenn deren Intensität nicht größer als die Dauerstandfestigkeit des Porenbetons war. Die eigenen Versuchsergebnisse lassen weder eine Steigerung noch eine Verringerung des Widerstandes als Folge derartiger Belastungen erkennen.

Der kriechbedingte Abbau von Spannungsspitzen, der insbesondere bei Normalbeton zu beobachten ist, spielt bei Porenbeton vermutlich eine untergeordnete Rolle. Das Kriechen des Normalbetons bewirkt Umlagerungen im Gefüge, was eine Entlastung hoch beanspruchter Bereiche zur Folge hat. Der Ausfall dieser Bereiche und somit das Gesamtversagen wird dadurch verzögert. Porenbeton besitzt ein

im Vergleich zu Normalbeton wesentlich geringeres Kriechvermögen, sodass Spannungen, die durch das Nachgeben von Teilbereichen frei werden, nicht in vergleichbarem Maß auf benachbarte Teilbereiche umgelagert werden können.

Abgesehen von den Ergebnissen nach Wittmann & Zaitsev (1974) ist ein vorbeanspruchungsbedingter Festigkeitszuwachs bisher ausschließlich an Betonarten festgestellt worden, deren Hydratation zu Beginn der Versuche noch nicht abgeschlossen war, siehe Kapitel 3.2.2. Dies lässt den Schluss zu, dass Vorbelastungen nur dann eine maßgebliche Erhöhung des Widerstandes bewirken können, wenn das Material im Untersuchungszeitraum noch einer signifikanten Festigkeitsentwicklung unterliegt.

Vereinfachend wird angenommen, dass im deformierten Betongefüge infolge Hydratation zusätzliche Verbindungen entstehen können, die sich bei Änderungen des Spannungs- bzw. Deformationszustandes an der Aufnahme der zusätzlichen Kräfte beteiligen. Dabei ist nicht auszuschließen, dass auch die chemischen Prozesse von der mechanischen Beanspruchung beeinflusst werden, z. B. durch rissbedingte Feuchtigkeitsdiffusion [Blaschke 1993] oder infolge veränderter Druckverhältnisse. Es wird davon ausgegangen, dass diese Prozesse beim untersuchten Porenbeton nahezu zum Erliegen gekommen sind und folglich ein Festigkeitszuwachs im belasteten Zustand nicht festgestellt werden kann.

Auf der Grundlage der experimentell bestimmten Dauerstandfestigkeit des Porenbetons werden die Messdaten im Folgenden dahingehend analysiert, ob sich der Übergang von der stabilen zur instabilen Phase durch charakteristische Änderungen des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens auszeichnet. Zur Interpretation grundlegender Phänomene wird auf die Modellvorstellungen von Kapitel 4 zurückgegriffen.

5.3.2.2 Monoton ansteigende Beanspruchung

Die Beanspruchungsgeschwindigkeit hat bei monoton ansteigender Beanspruchung einen maßgeblichen Einfluss auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Porenbetons. Die Längsstauchungen und Querdehnungen nehmen bis zum Versagen überproportional mit der Beanspruchung zu, wobei die Anstiege der Funktionen umso größer sind, je zügiger die Beanspruchung aufgebracht wird. Da diese Parameter von der Beanspruchungsgeschwindigkeit abhängen, müssen auch die daraus abgeleiteten Größen Funktionen der Beanspruchungsgeschwindigkeit sein. Dies betrifft im Sinne der Arbeit die Querdehnzahlen, Volumenänderungen, Gestaltänderungen sowie alle angegebenen Steifigkeiten.

Für größere Beanspruchungsgeschwindigkeiten ergeben sich größere *Bruchspannungen* und *Längsstauchungen* im Bruchzustand (Tafel 5.2a, c, e). Mit Hinblick auf die Bruchlängsstauchungen zeigt sich im Vergleich zu anderen Betonarten, bei denen die Bruchstauchungen im Gegensatz dazu für langsam eingetragene Beanspruchungen größer sind, eine Besonderheit des Porenbetons, vgl. Tafel 5.2a und Abb. 3.10b. Eine mögliche Ursache für dieses Phänomen besteht in der wesentlich geringeren Kriechwilligkeit des Porenbetons. Kriechbedingte Umlagerungen im Gefüge, die zum Abbau von örtlichen Spannungsspitzen führen würden, sind nur in geringem Umfang möglich. Der Ausfall einzelner Teilbereiche führt somit zügig zum Gesamtversagen.

Die absolute Lage der in Kapitel 3.4.2 diskutierten **Schwellenwerte** kann nicht mit Versuchen bestimmt werden, bei denen die Beanspruchung bis zum Versagen monoton gesteigert wird, Abb. 3.13. Die Lage hängt wesentlich von der Beanspruchungsgeschwindigkeit ab. Hinzuzufügen ist, dass der Einfluss der Zeit umso deutlicher in Erscheinung tritt, je größer die den Schwellenwerten zugeordnete Beanspruchungsintensität ist. Die Interpretationen zur Dominanz der Querverformungen und zu den

Volumenänderungen nach Abschnitt 3.4.2, die sich auf diese Schwellenwerte beziehen, behalten dennoch ihre Gültigkeit.

Das Verhältnis, in dem sich Querdehnungen und Längsstauchungen zueinander entwickeln, kehrt sich bei steigender Beanspruchung um. Bei höheren Beanspruchungsintensitäten nehmen bei Porenbeton die Querdehnungen im Verhältnis zu den Längsstauchungen überproportional zu, was auch für andere Betonarten charakteristisch ist. Der Minimalwert für die *Querdehnzahl*, **erster Schwellenwert**, kann bei quasistatischer Belastung näherungsweise Beanspruchungsintensitäten zugeordnet werden, die nicht größer als ein Drittel der mittleren Kurzzeitdruckfestigkeit sind.

Der **zweite Schwellenwert** kennzeichnet das Ende der Phase, in der das Gefüge mit steigender Beanspruchung überproportional verdichtet wird, Abb. 3.13. Diesem Punkt ist der Minimalwert des *Kompressionsmoduls* zugeordnet. Eine Zunahme dieses Wertes bei weiterer Lasterhöhung wird auf die steigende Dominanz der Querdehnungen zurückgeführt, die serienabhängig und je nach Beanspruchungsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Beanspruchungsintensitäten beobachtet wurde.

Die im bruchnahen Bereich größeren Werte für den Kompressionsmodul sind als *scheinbare Steifigkeitserhöhung* anzusehen. Ein konstanter Kompressionsmodul ergibt sich für den Sonderfall, dass sich die sphärische Dehnung proportional zur sphärischen Spannung entwickelt. Dabei ist es unerheblich, ob Querdehnungen und Längsstauchungen proportional oder nichtproportional mit der Spannung zunehmen. Im vorliegenden Fall zeigt der Minimalwert des Kompressionsmoduls den Übergang von überproportionaler zu abklingender Materialverdichtung an, Abb. 3.13.

Die steigende Dominanz der Querverformungen im bruchnahen Bereich ergibt sich im Wesentlichen aus der Bildung von Längsrissen, die eine Aufweitung und Auflockerung des Probekörpers in Querrichtung bewirken, was makroskopisch als Dehnungszuwachs wahrzunehmen ist. Inwiefern ein erstes, moderates Ansteigen der Kompressionssteifigkeit stabil ablaufende Rissprozesse bzw. Kriechen in Querrichtung als Hauptursache hat, lässt sich nicht einschätzen.

Erreicht die Beanspruchungsintensität die Schwelle der Dauerstandfestigkeit, tritt der Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die Materialverformungen in besonderem Maße in Erscheinung. Daraus folgt, dass die Lage des **dritten Schwellenwertes**, der dem minimalen *Probekörpervolumen* zugeordnet ist, empfindlich auf Änderungen des Last-Zeit-Regimes reagiert, Abb. 3.13. Bei monoton ansteigender Beanspruchung wurde das minimale Probekörpervolumen bei Beanspruchungsintensitäten zwischen 90 % und 117 % der mittleren Kurzzeitdruckfestigkeit festgestellt. Es ist nicht, wie gelegentlich angenommen, zur Bewertung der Dauerstandfestigkeit geeignet.

Da sich die elastischen Eigenschaften, die für die Dauerstandfestigkeit als maßgeblich angesehen werden, nicht aus Spannungs-Dehnungs-Zusammenhängen, denen eine einmalige, monoton steigende Beanspruchung zugrunde liegt, ableiten lassen, ist auch eine Beurteilung der Dauerstandfestigkeit auf der Basis derartiger Versuche nicht möglich.

5.3.2.3 Ruhende Belastung

Auf der Basis der Versuche mit ruhender Belastung kann die zeitabhängige Entwicklung der Verformungen für die einzelnen Beanspruchungsintensitäten verfolgt werden. Dadurch ist eine Zuordnung der Verformungs-Zeit-Zusammenhänge zur stabilen bzw. instabilen Phase des Tragverhaltens möglich, wenngleich sich die elastischen Anteile nicht aus den Gesamtdeformationen separieren lassen.

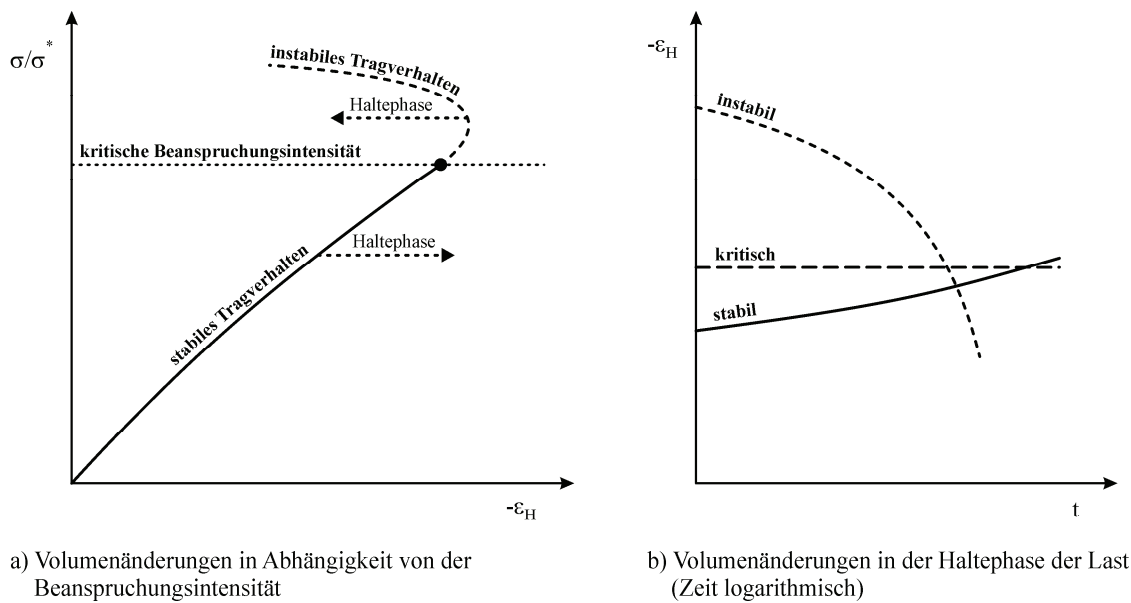


Abb. 5.12: Volumenänderungen

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass eine derartige Einschätzung, die sich allein auf den Verformungszuwachs in Längs- bzw. Querrichtung bezieht, schwerfällt. Lediglich die *Volumenänderungen*, die aus beiden Anteilen ermittelt werden, lassen erkennen, ob eine Überlastung des Materials stattgefunden hat oder nicht.

Entsprechend den Versuchsergebnissen genügt es, die Last für kurze Zeit konstant zu halten, um anhand der Volumenänderungen eine Prognose hinsichtlich der Stabilität des Tragverhaltens aufzustellen. Beanspruchungszustände, die nicht zum Versagen führen, sind sowohl bei Laststeigerung als auch unmittelbar nach Erreichen der Lasthaltephase von einem abnehmenden Probekörpervolumen gekennzeichnet, Abb. 5.12a. Demgegenüber gehen Überbeanspruchungen des Porenbetons grundsätzlich mit einem relativ zunehmenden Probekörpervolumen einher, das bereits zu Beginn der Lasthaltephase zu beobachten ist. Beanspruchungszustände, bei denen für das Probekörpervolumen ab Erreichen der Lasthaltephase keine zusätzlichen Änderungen festgestellt werden können, sind als kritisch zu bewerten, Abb. 5.12a.

Die Feststellung, dass die Probekörper unmittelbar vor dem Versagen zu dilatantem Verhalten neigen, steht mit den Ergebnissen der Versuche mit monoton gesteigerter Beanspruchung im Einklang. Im Rahmen dieser Versuche erfolgte der Übergang von Kompaktion zu Dilatation in Abhängigkeit von der Beanspruchungsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Beanspruchungsintensitäten, was auf die zuvor dargelegten zeitabhängigen Zuwächse an Längsstauchungen und Querdehnungen zurückzuführen ist, welche unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten unterliegen. Als wesentliche Ursache für dieses Phänomen wird die Längsrisssbildung angesehen.

Ein Vorteil der Versuche mit ruhender Belastung besteht darin, dass die in der Lasthaltephase festzustellenden Formänderungen für die Einschätzung des Tragverhaltens herangezogen werden können und dadurch der Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit an Bedeutung verliert. Die Lage des *dritten Schwellenwertes*, der mit der Dauerstandfestigkeit korrespondiert, kann somit innerhalb kurzer

Zeitdauer bestimmt werden, weitgehend unabhängig davon, mit welcher Geschwindigkeit die Beanspruchung aufgebracht wird.

5.3.2.4 Niederzyklisch gesteigerte Belastung

Auf der Grundlage der Versuche mit niederzyklisch gesteigerter Belastung besteht die Möglichkeit, die bleibenden und elastischen Verformungsanteile zu separieren und deren Entwicklung über die Lastgeschichte zu verfolgen. Im Zusammenhang mit den elastischen Eigenschaften wird dem auf den Volumenänderungen basierenden Kompressionsmodul besondere Bedeutung beigemessen, weil sowohl die Längs- als auch die Querverformungen unmittelbar in die Beurteilung der Gefügestabilität einbezogen werden.

Erkenntnisse zur **Akkumulation der ablaufenden Strukturänderungen** liefern die verformungsspezifischen Anteile der *Formänderungsenergie*. Ausgewertet werden die je Zyklus für inelastische Phänomene dissipierten Energieanteile $D_{S,I}$ und $D_{S,D}$, wobei die *Längsstauchungen* bzw. die *Gestaltänderungen* zugrunde liegen, Abb. 2.4c. Diese Auswertungsmethode gestattet eine umfassende Einschätzung in Bezug auf das Maß an strukturellen Änderungen, da sowohl plastische Verformungen als auch Änderungen der elastischen Eigenschaften berücksichtigt werden.

Diese Art der Auswertung ist lediglich für Beanspruchungssituationen sinnvoll, die sich auf die stabile Phase des Tragverhaltens beschränken. In dieser Phase kann davon ausgegangen werden, dass die Verformungen und ebenso die daraus abgeleiteten Energieanteile ein beanspruchungsabhängiges Potential aufweisen. Wird die Grenze zur instabilen Phase des Tragverhaltens überschritten, streben die Dehnungen und somit die Energieanteile nicht mehr einem stabilen Endwert entgegen, der allein durch die Beanspruchungsintensität bestimmt wird. Hier gewinnen die Rissprozesse an Bedeutung, die instabil voranschreiten und das Gefüge makroskopisch trennen. Ein Zusammenhang zwischen dissipierter Energie und Probekörperversagen kann nicht hergestellt werden. Eine Beurteilung der Gefügestabilität im Sinne der Dauerstandfestigkeit ist auf der Basis dieser Auswertungen nicht möglich.

Die in Tafel 5.4r-t dargestellten Auswertungen lassen darauf schließen, dass der Einfluss der Lastgeschichte auf das Materialverhalten für Beanspruchungen im Gebrauchslastbereich praktisch vernachlässigbar ist, da nahezu keine Energie für inelastische Materialreaktionen dissipiert wird. Bei höheren Beanspruchungsintensitäten gewinnt dieser Einfluss an Bedeutung. Durch Vorbelastungen können Strukturänderungen vorweggenommen werden. Der durch die Vorbelastungen herbeigeführte Strukturzustand bleibt weitgehend unverändert erhalten, solange die Intensität der nachfolgenden Beanspruchungen nicht größer als die der Vorbelastung ist. In diesem Zusammenhang ist von Bedeutung, dass sich ein wesentlicher Teil der Strukturänderungen innerhalb weniger Minuten vollzieht.

Ein Vergleich der Anteile $D_{S,I}$ und $D_{S,D}$ einzelner Probekörper zeigt, dass diese Anteile über die gesamte Lastgeschichte nahezu identische Werte aufweisen. Mit Bezug auf die Zerlegung des Spannungs- und Deformationszustandes in einen sphärischen und einen deviatorischen Teilzustand lässt sich somit feststellen, dass der wesentliche Teil der für Strukturänderungen dissipierten Formänderungsenergie für Gestaltänderungen aufgezehrt worden ist, Volumenänderungen weitgehend als elastisch angesehen werden können.

Anhand der mechanischen Modelle wurde in Kapitel 4 dargelegt, dass die *Steifigkeit* des Materials Rückschlüsse auf dessen Langzeittragfähigkeit zulässt, da sie als Maß zur Bewertung der elastischen

Eigenschaften aufgefasst werden kann. Entsprechend den Vorüberlegungen treten die elastischen Eigenschaften erst bei wiederholter Belastung in den Vordergrund, weil die Verformungen bei Erstbelastung von nicht zu quantifizierenden viskosen und bleibenden Formänderungsanteilen überlagert sein können.

Die Darlegungen zu den dissipativen Vorgängen zeigen, dass ein bedeutender Teil dieser Formänderungen bereits nach kurzzeitiger Belastung auftritt, sofern die Beanspruchungen der stabilen Phase des Materialverhaltens zugeordnet sind. Die Volumenänderungen des Porenbetons weisen bei derartigen Beanspruchungen lediglich marginale viskose Formänderungsanteile auf. Die mechanische Bedeutung der *Kompressionssteifigkeit* für das Langzeittragverhalten des Porenbetons geht daraus unmittelbar hervor.

Die Abbildungen zu den Tangentenmoduln lassen erkennen, dass derartige Untersuchungen besondere Anforderungen an die Messgenauigkeit stellen, Tafel 5.5g-l. Im Zusammenhang mit der Auswertung der Steifigkeiten soll jedoch primär festgestellt werden, ob das Spannungs-Dehnungs-Verhalten auf entsprechenden Laststufen als stabil bewertet werden kann. Nähere Untersuchungen zu den Krümmungen einzelner Spannungs-Dehnungs-Funktionen, die durch die dargestellten Tangentensteifigkeiten möglich sind, stehen dabei im Hintergrund. In diesem Sinne ist es bei Versuchen mit wiederholter Belastung ausreichend, die Werte des Sekantenmoduls aufeinanderfolgender Zyklen zu analysieren. Der praktische Vorteil besteht darin, dass diese Art der Auswertung weniger anfällig gegenüber Unregelmäßigkeiten ist, die messtechnische Ursachen haben.

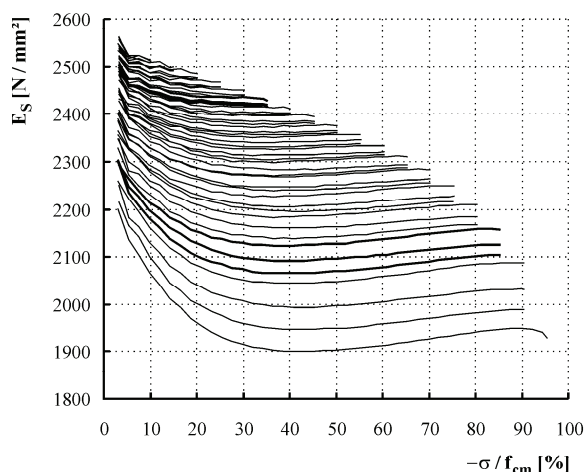
In Tafel 5.6a-f sind die Steifigkeiten der Probekörper H RS-01 und 314 ergänzend zu Tafel 5.5g-l als *Sekantenmoduln* angegeben, Funktionen für weitere Probekörper sind im Anhang enthalten. Die Auswertungen zu den Sekantensteifigkeiten bestätigen die Ergebnisse der Vorüberlegungen in Kapitel 4. Danach tritt ein großer Teil der laststufenspezifischen Steifigkeitsänderungen bereits im jeweils ersten Zyklus einer Laststufe auf, sofern die Beanspruchungen auf die stabile Phase des Tragverhaltens beschränkt bleiben. Die Steifigkeiten für die Sekundär- und Tertiärzyklen jeder Laststufe sind bei niedrigen Beanspruchungen nahezu identisch.

Beim **Übergang zur instabilen Phase** des Tragverhaltens ergeben sich für die *Kompressionssteifigkeit* charakteristische Änderungen. Während Beanspruchungen niedriger Intensität zu einer marginalen Abnahme der Kompressionssteifigkeit führen, bewirken Druckspannungen, die größer als die *Dauerstandfestigkeit* sind, eine signifikante Vergrößerung des Kompressionsmoduls, Tafel 5.6c, d. Eine Bewertung der Dauerstandfestigkeit des Porenbetons ist damit auf der Grundlage von Kurzzeitversuchen möglich, wenn die Belastung in Zyklen erfolgt.

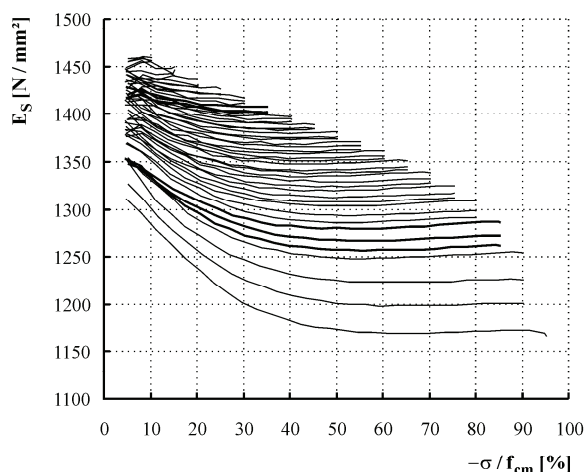
Wie bereits vorangehend erläutert wurde, zeichnet sich das Tragverhalten bei höheren Beanspruchungsintensitäten durch die steigende Dominanz der Querverformungen aus. Die größeren Zuwächse der Querverformungen bewirken eine Vergrößerung des berechneten Wertes für den Kompressionsmodul, wodurch der Eindruck entsteht, die Steifigkeit gegenüber Volumenänderungen sei angestiegen. Physikalisch kann eine Zunahme des Wertes für den Kompressionsmodul nicht als Vergrößerung der Steifigkeit interpretiert werden, wenn eine Vergrößerung des hydrostatischen Druckes eine Aufweitung des Materials bewirkt.

Eine derartige Aufweitung des Gefüges hat bei den Versuchen stattgefunden, was die Auswertungen zu den Querdehnzahlen und den Volumenänderungen belegen. Diese Aufweitung wird im Wesentli-

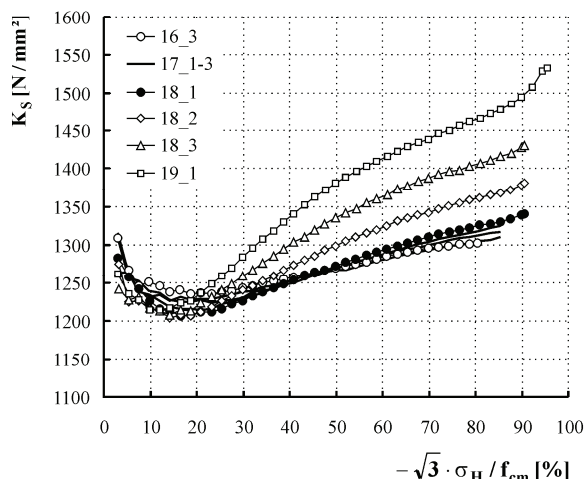
Tafel 5.6: Versuchsergebnisse: Sekantensteifigkeiten



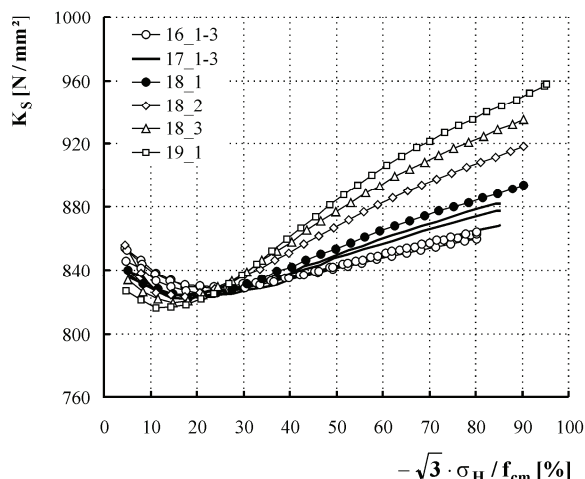
a) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade, Probekörper H RS-01, Serie 1



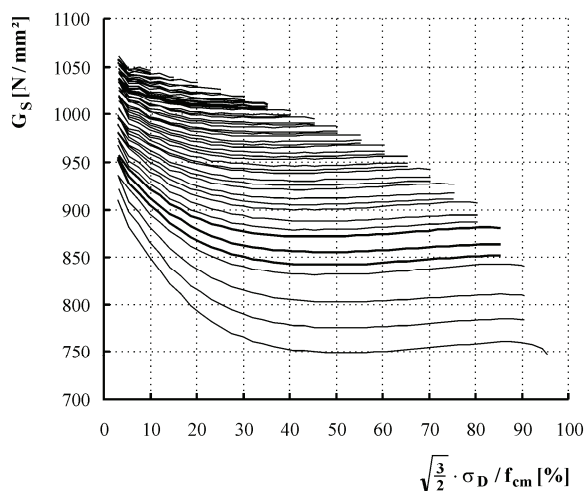
b) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade, Probekörper 314, Serie 3



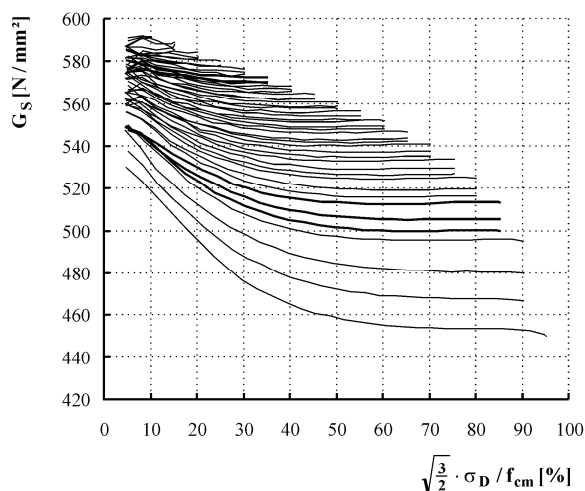
c) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade ausgewählter Zyklen, Probekörper H RS-01, Serie 1



d) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade ausgewählter Zyklen, Probekörper 314, Serie 3



e) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade, Probekörper H RS-01, Serie 1



f) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade, Probekörper 314, Serie 3

chen auf inelastische Phänomene zurückgeführt, die auf Risse in Richtung der äußeren Druckbelastung schließen lassen. Der Anstieg des Kompressionsmoduls liegt somit in Deteriorationsprozessen begründet und stellt lediglich scheinbar eine Vergrößerung der Steifigkeit dar.

5.3.3 Bruchverhalten

Die Bruchbilder sind das Ergebnis der zuvor in die Probekörper eingetragenen Beanspruchungen und die dadurch hervorgerufenen Deteriorationsmechanismen. Typischerweise erfolgt die makroskopische Gefügetrennung bei Normalbeton unter einachsiger Druckbelastung durch Risse in Richtung der äußeren Druckbelastung, vgl. Kapitel 3.4.1. Diese Risse, die durch Zugspannungen senkrecht zur äußeren Lastrichtung hervorgerufen werden, bewirken ein Ansteigen der Querdehnzahl und eine relative, in einigen Fällen auch absolute Zunahme des Probekörpervolumens. Die Vergrößerung der Probekörperabmessungen liegt in der Aufweitung der Risse und nicht in Dehnungen begründet, sodass die Formulierung „Volumenzunahme“ nur für die makroskopische Betrachtungsebene gilt. In der finalen Phase schreiten die Rissmechanismen instabil voran und bewirken den Übergang vom Kontinuum zum Diskontinuum.

Diese Merkmale wurden auch bei den an Porenbeton durchgeführten Versuchen festgestellt. Die Bruchmechanismen waren bei allen Versuchen prinzipiell gleich, ein Einfluss der Lastgeschichte war nicht erkennbar. Die Bruchbilder und die versuchstechnisch ermittelten Querdehnzahlen und Volumenänderungen lassen den Schluss zu, dass auch bei einachsig auf Druck beanspruchtem Porenbeton **Längsrisse** das Versagen initiieren. Zerstörungszonen quer zur Richtung der äußeren Druckkraft, die in [Wittmann & Zaitsev 1974] aufgefallen waren und die Annahme von Sell (1970) bestätigten, das Versagen von Porenbeton sei auf das Ausknicken von Zellwänden zurückzuführen, konnten nicht beobachtet werden.

Die „Druckkegel“ an den Probekörperendflächen, soweit sich diese ausgebildet haben, weisen meist geringe Höhen auf. Ein gegenseitiges Durchdringen der Kegel wurde nicht beobachtet. In einigen Fällen war zudem die Kegelbildung lediglich an einer Probekörperendfläche erkennbar. Folglich beeinflusst die reibungsbedingte Querdehnungsbehinderung an den Endflächen bei Probekörpern aus Porenbeton nicht in dem Maße das Bruchverhalten wie bei Normalbeton. Es ist anzunehmen, dass die in halber Probekörperhöhe durchgeführten Verformungsmessungen nicht maßgeblich von der Querdehnungsbehinderung an den Probekörperendflächen beeinflusst wurden.

5.3.4 Empfehlungen für Untersuchungskonzepte

Entsprechend den Ergebnissen der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen ist eine Eingrenzung der stabilen Phase des Tragverhaltens von Porenbeton auf der Basis von Kurzzeitversuchen möglich. Es können zwei *Methoden zur Bewertung der Dauerstandfestigkeit* unter einachsigen Druckbelastungen vorgeschlagen werden. Beide Methoden stützen sich auf die Analyse der *Kompressibilität* des Porenbetons.

Methode 1

Bei Methode 1 werden die Änderungen des *Probekörpervolumens* bei konstant gehaltener Spannung verfolgt, Abb. 5.12. Wenn das Probekörpervolumen in der Lasthaltephase zunimmt, ist damit zu rechnen, dass die Schwelle zur instabilen Phase des Tragverhaltens überschritten wurde und die entsprechende Spannung größer als die Dauerstandfestigkeit ist. In diesem Fall ist mit einem zeitabhängigen Versagen des Probekörpers zu rechnen.

Vorgehensweise: Zylindrische Probekörper aus Porenbeton werden einachsigen Druckbeanspruchungen ausgesetzt, die nach Erreichen der vorgesehenen Beanspruchungsintensität für kurze Zeit konstant gehalten werden. Während des Versuches werden die Kraft, die Zeit sowie die Längs- und Querverformungen des Probekörpers erfasst. Aus den gemessenen Verformungswerten wird die Volumendehnung berechnet. Anhand der für die Lasthaltephase zu ermittelnden Volumendehnungen lässt sich einschätzen, ob bei der gewählten Beanspruchungsintensität ein Standversagen zu erwarten ist.

Methode 2

Methode 2 basiert auf der Analyse der Kompressibilität bei wiederholter Belastung. Es hat sich herausgestellt, dass die *Kompressionssteifigkeit* des Porenbetons sensibel auf Überbeanspruchungen der Struktur reagiert. Diese Zustände sind durch signifikante Zuwächse des Kompressionsmoduls gekennzeichnet.

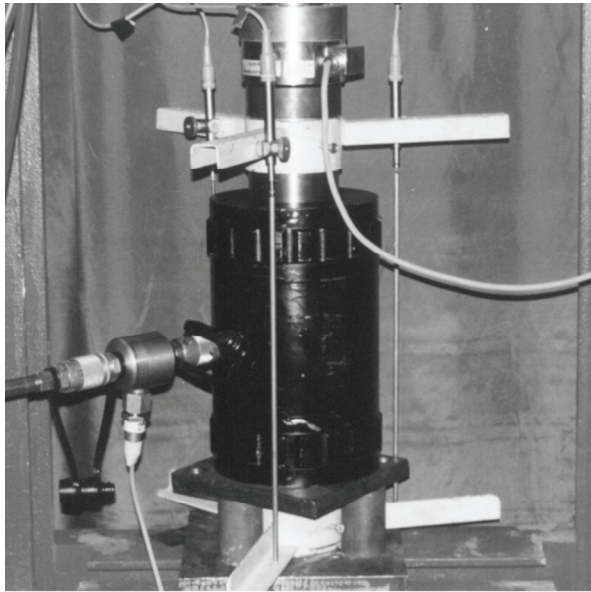
Vorgehensweise: Zylindrische Probekörper aus Porenbeton werden einachsigen, niederzyklisch gesteigerten Druckbelastungen ausgesetzt, deren Intensität in vorgegebenen Lastschritten erhöht wird. Während des Versuches werden die Kraft sowie die Längs- und Querverformungen des Probekörpers erfasst. Aus diesen Größen wird die Kompressionssteifigkeit für die einzelnen Belastungspfade berechnet. Anhand der Änderung der Kompressionssteifigkeit kann die Dauerstandfestigkeit eingeschätzt werden.

Mehrachsiges Untersuchungen

Aufgrund der Einbeziehung der Verformungen in alle Hauptrichtungen sind diese Untersuchungsmethoden nicht auf Versuche mit einachsiger Druckbelastung beschränkt. Der Vorteil der auf die Kompressionssteifigkeit gestützten Auswertung besteht darin, dass dieses Untersuchungsprinzip auch bei mehrachsigen Beanspruchungskonstellationen angewendet werden kann, die keine Aufweitung der Struktur zulassen.

In [Raue et al. 2000a] wird über experimentelle Untersuchungen zum Bruchwiderstand von Porenbeton unter *mehrachsiges Beanspruchungen* berichtet, die am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau (IKI) der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt wurden. Darin wird darauf hingewiesen, dass die Probenbruchererkennung bei Porenbeton unter monoton steigenden mehrachsigen Druckbeanspruchungen allgemein schwierig und bei rein hydrostatischer Belastung nicht möglich ist, wenn keine begleitenden Verformungsmessungen durchgeführt werden.

Der Versuchsaufbau für diese Versuche ist in Abb. 5.13a dargestellt. Als Probekörper wurden Porenbetonzylinder mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Länge von 20 cm verwendet. Die Belastung erfolgte in axialer Richtung mit Stahlzylindern und in radialer Richtung mit Hilfe einer Gummimanschette, die hydraulisch an die Probekörpermantelfläche gepresst wurde.



a) Versuchsaufbau



b) links: Probekörper nach hydrostatischer Belastung, rechts: Ausgangszustand (Referenzprobekörper)

Abb. 5.13: Triaxialversuche an Porenbeton [Raue et al. 2000a]: Versuchsaufbau und Probekörper

Abb. 5.13b zeigt einen Probekörper nach einem Triaxialversuch im Vergleich zu einem unbelasteten Referenzkörper. Die Druckspannungen waren in allen Hauptrichtungen gleich groß. Es sind erhebliche irreversible Deformationen in alle Raumrichtungen erkennbar, die Struktur wurde verdichtet. Zu bemerken ist, dass der Triaxialversuch in der Phase steigender Druckspannungen, d. h. vor einem möglichen Druckabfall abgebrochen wurde. Dennoch kann unterstellt werden, dass die Beanspruchungen weit über die stabile Phase des Materialverhaltens hinausgegangen sein müssen, wenngleich kein „Bruch“ festzustellen war. Bei dem im Anschluss an diesem Probekörper durchgeführten Versuch mit monoton steigender, einachsiger Druckbelastung konnte aufgrund der zuvor herbeigeführten Materialentfestigung keine nennenswerte Bruchspannung ermittelt werden. Die Bruchspannung betrug lediglich etwa 10 % der mittleren einachsigen Kurzzeitdruckfestigkeit dieser Serie.

Es wird angenommen, dass die mit der Probenbrucherkennung zusammenhängenden Probleme mit der vorangehend als Methode 2 vorgeschlagenen, auf der Analyse der Kompressionssteifigkeit beruhenden Untersuchungsmethode gelöst werden können. Gleichzeitig wird damit ein Kriterium zur Verfügung gestellt, mit dessen Hilfe die Grenze zum instabilen Materialverhalten unter mehrachsiger Beanspruchung beurteilt werden kann. Eine Überprüfung dieser These ist anhand der zu den Triaxialversuchen vorliegenden Versuchsdaten nicht möglich, da die Belastung nicht in Zyklen erfolgte und zudem die erforderlichen Messwerte für die Verformungen fehlen.

5.4 Verifikation der Hypothesen an anderen Betonarten

Zur Verifikation der vorgenannten Hypothesen zur Bewertung der Dauerstandfestigkeit stehen Messdaten von Versuchen zur Verfügung, die ebenfalls an der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt worden sind. Dabei wurde das Verhalten von *Normalbeton* (NB) [Bolle 1999] und *selbstverdichtendem hochfestem Beton* (SVB) [Schwabach 2005] untersucht. Das Betonalter, in dem mit den Versuchen begonnen wurde, variiert zwischen 7 und etwa 128 Tagen. Die Lastaufbringung erfolgte in Zyklen, Anhang D.

Die Aufbereitung der Messdaten in Tafel 5.7 erfolgte nach den gleichen Grundsätzen wie für Porenbeton, es gelten die Hinweise von Kapitel 5.2.1. Weitere Zusammenhänge sind probekörperweise in Anhang D dargestellt. Zu bemerken ist, dass Vergleichswerte zur Kurzzeitdruckfestigkeit fehlen, sodass die Beanspruchungsintensität in Bezug auf die Kurzzeitdruckfestigkeit für die Probekörper nicht angegeben werden kann.

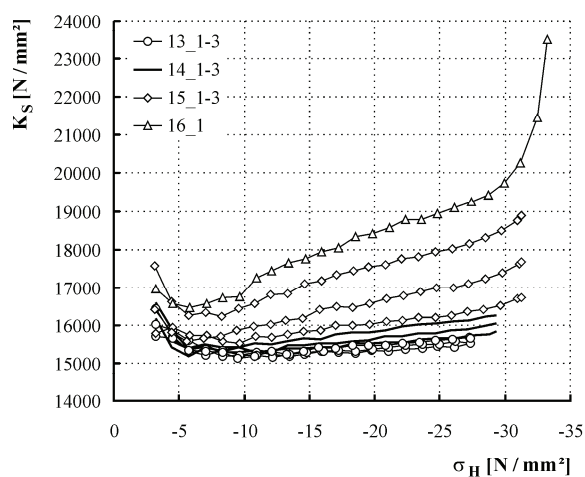
Entsprechend den Untersuchungsergebnissen weist das Materialverhalten des Porenbetons in wesentlichen Merkmalen Parallelen zu dem anderer Betonarten auf. Diese Feststellung bezieht sich sowohl auf das Tragverhalten in der stabilen Phase als auch auf die Mechanismen, die das Versagen der Probekörper einleiten. Deshalb wird unterstellt, dass die stabile Phase des Tragverhaltens auch bei anderen Betonarten mit Hilfe der vorangehend erläuterten Methoden, die sich auf die Untersuchung der Volumenänderungen beziehen, eingegrenzt werden kann.

Die Auswertungen zeigen, dass alle Probekörper vor dem Versagen zu *dilatantem Verhalten* tendieren, sodass die Dilatanz betonübergreifend als Merkmal der Überbeanspruchung aufgefasst werden kann. In Bezug auf Normalbeton und selbstverdichtenden hochfesten Beton besteht kein Zweifel daran, dass die Dilatanz ihre Ursache in Längsrissen hat, Kapitel 3.4.1.

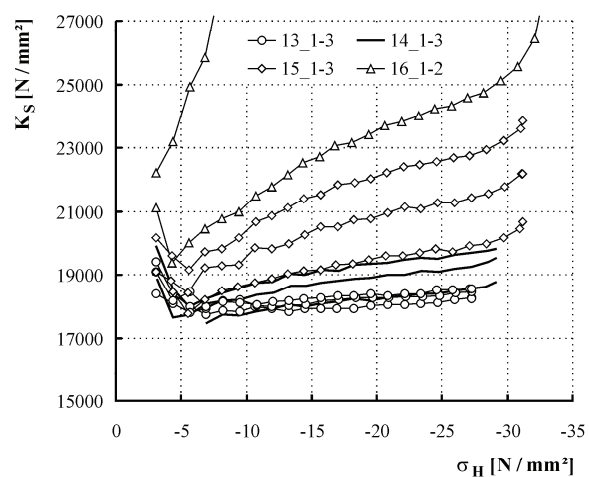
In Tafel 5.7 sind die *Kompressionsmoduln* der ausgewählten Probekörper für die letzten Laststufen als Sekantenmoduln dargestellt. Bei den Probekörpern Cyl 01-28 und Cyl 02-91 ist im Rahmen der Versuche kein Versagen eingetreten.

Wie bereits zuvor am Beispiel des Porenbetons festgestellt wurde, bewirken hohe Druckspannungen auch bei Normalbeton und selbstverdichtendem hochfestem Beton eine signifikante Vergrößerung des Wertes für den Kompressionsmodul. Die vorangegangenen Erläuterungen zur deteriorationsbedingten „Zunahme“ der Kompressionssteifigkeit können unmittelbar auf diese Beobachtungen übertragen werden. In Analogie zu Porenbeton wird für Normalbeton und selbstverdichtenden hochfesten Beton unterstellt, dass die Vergrößerung des Kompressionsmoduls als Indiz für instabil voranschreitende Strukturänderungen aufgefasst werden kann, die für Beanspruchungen oberhalb der Dauerstandgrenze kennzeichnend sind.

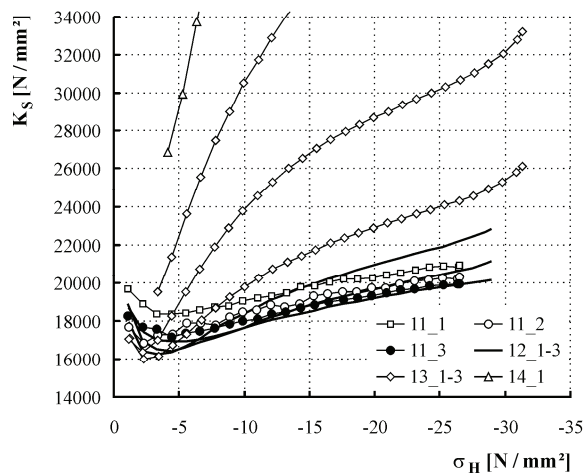
Der Unterschied zwischen stabilem und instabilem Tragverhalten lässt sich am Beispiel des Probekörpers Cyl 02-91 besonders deutlich herausstellen, da bei diesem Probekörper eine höhere Zyklenzahl gewählt wurde. Entsprechend Tafel 5.7f kann für Laststufe 7 stabiles Materialverhalten unterstellt werden, da die Kompressionssteifigkeit während der 6 Zyklen dieser Laststufe nahezu unverändert blieb. Auf der Grundlage der Kompressionssteifigkeit kann für Laststufe 8 von einer Überbeanspruchung der Struktur ausgegangen werden, die instabil voranschreitende strukturelle Änderungen bewirkt hat. Ein Abklingen dieser Prozesse zeichnet sich während der 12 Zyklen nicht ab, sodass auf

Tafel 5.7: Kompressionssteifigkeit von Normalbeton (NB) und selbstverdichtendem Beton (SVB)

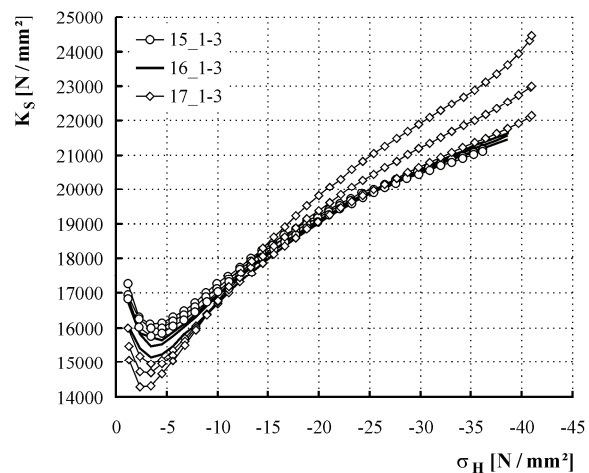
a) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der sphärischen Spannung, Belastungspfade ausgewählter Zyklen, Probekörper Z1, NB, Alter: >128 d



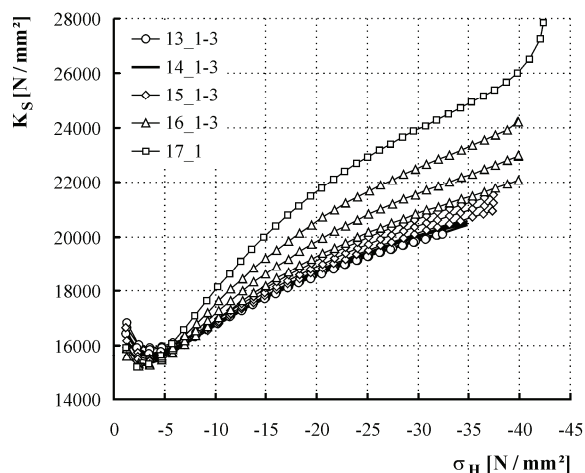
b) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der sphärischen Spannung, Belastungspfade ausgewählter Zyklen, Probekörper Z2, NB, Alter: >128 d



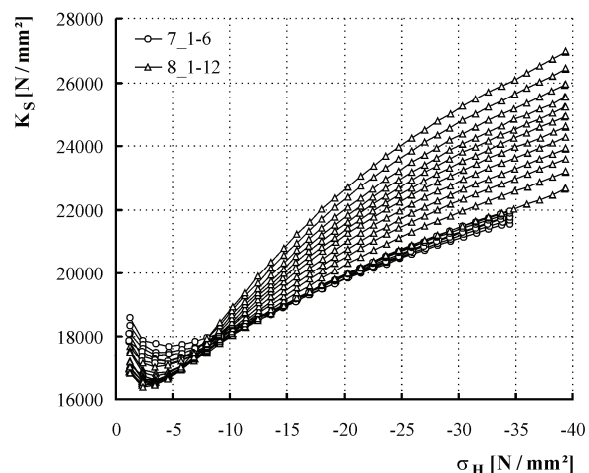
c) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der sphärischen Spannung, Belastungspfade ausgewählter Zyklen, Probekörper Cyl 02-07, SVB, Alter: 7 d



d) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der sphärischen Spannung, Belastungspfade ausgewählter Zyklen, Probekörper Cyl 01-28, SVB, Alter: 28 d



e) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der sphärischen Spannung, Belastungspfade ausgewählter Zyklen, Probekörper Cyl 02-70, SVB, Alter: 70 d



f) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der sphärischen Spannung, Belastungspfade ausgewählter Zyklen, Probekörper Cyl 02-91, SVB, Alter: 91 d

dieser Laststufe mit einem zeitabhängigen Versagen des Probekörpers gerechnet werden muss, die *Dauerstandgrenze* folglich überschritten wurde.

Die Ergebnisse stehen mit den vorangehenden Darlegungen, die sich auf das Materialverhalten von Porenbeton beziehen, im Einklang. Sie zeigen, dass das verwendete Untersuchungsprinzip mit *zyklisch eingetragener Beanspruchung* auch bei Normalbeton und selbstverdichtendem hochfestem Beton angewendet werden kann, wenn Beanspruchungen hinsichtlich der Wirkung auf die Struktur bewertet werden sollen. Überbeanspruchungen ziehen unmittelbar maßgebliche Änderungen der Kompressibilität nach sich.

Kapitel 6

Schlussfolgerungen

Das Tragverhalten von Normalbeton und Porenbeton ist durch die Wechselwirkung der Größen Kraft, Verformung und Zeit charakterisiert. So wie bei Normalbeton gibt es auch bei Porenbeton charakteristische Phasen des Tragverhaltens, obwohl hinsichtlich der Materialstruktur Unterschiede vorhanden sind. Die Einbeziehung von hochfestem selbstverdichtendem Beton liefert ähnliche Ergebnisse, sodass sich die an Porenbeton gewonnenen Erkenntnisse als betontypisch verallgemeinern lassen.

Die Phasen des Tragverhaltens werden durch Schwellenwerte voneinander abgegrenzt. Eine Verbindung von Schwellenwerten und wesentlichen Materialeigenschaften, wie z. B. der Dauerstandfestigkeit, ist aus Beobachtungen und Messungen an Probekörpern unter monoton gesteigerter Beanspruchung nicht ableitbar. Versuche mit wiederholter Belastung sind wesentlich aussagefähiger, weil elastische und inelastische Verformungsanteile durch Be- und Entlastungen separiert werden können.

In der vorliegenden Arbeit wird mit Hilfe *mechanischer Modelle* der Einfluss beanspruchungsbedingter Strukturänderungen, wie z. B. von Mikroschädigungen, Mikro- und Makrorissen, auf das makroskopische Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Beton analysiert. Durch die gewählte Modellbildung lässt sich vergleichsweise komplexes Materialverhalten auf wenige Grundeigenschaften zurückführen und der Einfluss der Lastgeschichte einschließlich lang andauernder Belastungszustände auf das Widerstandsvermögen des Porenbetons analysieren.

Diese Modellüberlegungen zeigen, dass den *elastischen Eigenschaften* in Bezug auf das Langzeittragverhalten besondere Bedeutung beigemessen werden muss. In der Arbeit wird dargelegt, dass sich die Änderungen der elastischen Eigenschaften von Beton und Porenbeton experimentell näherungsweise bestimmen lassen, wenn die Belastung in Zyklen erfolgt.

Eine grundlegende Annahme der gesamten Untersuchungen besteht darin, dass *zwei elementare Phasen des Tragverhaltens* existieren, die durch die Dauerstandfestigkeit voneinander abgegrenzt werden: stabiles und instabiles Tragverhalten. Die Dauerstandfestigkeit ist ein elementarer Schwellenwert, sie stellt insbesondere aus der Sicht der Tragwerksplanung eine maßgebliche Grenze der Tragfähigkeit dar, da größere Spannungen nur für begrenzte Zeitdauer vom Material ertragen werden.

Die **Dauerstandfestigkeit** wurde an drei Mischungsvarianten des Porenbetons durch *Versuche mit ruhender Belastung* experimentell bestimmt. Für die Auswertung der Standzeiten wurde ein hyperbolischer Ansatz vorgeschlagen, der die Dauerstandfestigkeit als Asymptote bei unendlich lange andauernder Belastung ausweist. Die für die drei untersuchten Serien ermittelten Werte für die Dauerstandfestigkeit stimmen nahezu überein. Danach können Druckspannungen dauerhaft aufgenommen werden, die etwa 85 % der Kurzzeitdruckfestigkeit nicht überschreiten. Die Festlegungen nach DIN 4223 (2003) werden somit durch die Versuche bestätigt.

Die Beanspruchungsgeschichte hat einen wesentlichen Einfluss auf das Tragverhalten des Porenbetons. Dieser spiegelt sich im gesamten Verlauf der Last-Verformungs-Zusammenhänge sowie in den Werten für Kräfte und Verformungen im Bruchzustand wider. Last-Verformungs-Funktionen gelten ausschließlich in Zusammenhang mit einem definierten Beanspruchungsregime. Bereits die Modelluntersuchungen zeigen, dass von diesen Zusammenhängen unabhängige Arbeitslinien und Spannungs-Querdehnungs-Beziehungen nicht angegeben werden können. Hinzu kommt, dass die Längs- und Querverformungen in unterschiedlicher Weise von Beanspruchungsintensität und Zeit abhängen, so dass auch die daraus abgeleiteten Parameter Funktionen des Beanspruchungs-Zeit-Regimes sind.

Es ist nicht möglich, die Dauerstandfestigkeit aus Last-Verformungs-Kurven abzuleiten, die nur bei **monoton ansteigender Beanspruchung** ermittelt werden, da sich Schwellenwerte in Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Beanspruchungsintensitäten ergeben. Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Last-Verformungs-Zusammenhänge tritt bei hohen Beanspruchungen besonders deutlich in Erscheinung. Die Spannung, bei der das minimale Probekörpervolumen mit dieser Untersuchungsmethode festgestellt wird, hängt maßgeblich von der Belastungsgeschwindigkeit ab, sie kann nicht mit der Dauerstandfestigkeit in Verbindung gebracht werden.

Der *Bruchwiderstand* des Porenbetons gegenüber einachsigen Druckbeanspruchungen ist dadurch gekennzeichnet, dass der Betrag der Bruchspannung umso größer ist, je zügiger die Beanspruchungsintensität erhöht wird. Ebenso verhalten sich die Längsstauchungen im Bruchzustand. Für die weiteren Parameter, z. B. Querdehnungen, Querdehnzahlen, Volumen- und Gestaltänderungen ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem im Bruchzustand erreichten Wert und der Beanspruchungsgeschwindigkeit erkennbar.

Porenbeton neigt ebenso wie andere Betonarten in Versagensnähe zu dilatantem Verhalten. Dies macht die Dominanz der Querverformungen bei hohen Beanspruchungsintensitäten deutlich und lässt den Schluss zu, dass auch das Versagen des Porenbetons durch Risse in Richtung der äußeren Druckbelastung herbeigeführt wird. Die Bruchbilder lassen eine Analogie zu denen anderer Betonarten erkennen.

Auf der Grundlage der Versuche mit **ruhender Belastung** kann festgestellt werden, dass die *Volumenänderungen* für die Beurteilung des Langzeittragverhaltens dennoch von besonderer Bedeutung sind. Soweit entsprechende Beanspruchungen auf die stabile Phase des Tragverhaltens beschränkt bleiben, ist in der Lasthaltephase eine weitere zeitabhängige Materialverdichtung zu beobachten, deren Zuwächse rasch abklingen. Sobald die Druckspannungen die Dauerstandfestigkeit überschreiten, geht die anfängliche Volumenabnahme in der Lasthaltephase unmittelbar in eine relative Volumenzunahme über. Ein Ansatz, um die Dauerstandfestigkeit von Porenbeton auf der Grundlage von Kurzzeitversuchen zu prognostizieren, besteht somit darin, die Volumenänderungen unter konstant gehaltener Spannung zu verfolgen.

Die für das Langzeittragverhalten als wesentlich erachteten *elastischen Eigenschaften* des Porenbetons werden anhand von Versuchen mit **niederzyklisch gesteigerter Druckbelastung** analysiert. Über *Energiebilanzen*, deren Grundlage die in diesen Versuchen ermittelten Spannungs-Dehnungs-Informationen bilden, wird die Akkumulation der Strukturänderungen aufgezeigt.

Infolge von Beanspruchungen im Gebrauchslastbereich wird nahezu keine Energie für inelastische Phänomene dissipiert. Der Einfluss der Lastgeschichte kann also in diesem Bereich vernachlässigt

werden. Bei höheren Beanspruchungen wird Energie für irreversible Strukturänderungen dissipiert, wobei sich ein vergleichsweise großer Teil dieser Änderungen innerhalb kurzer Zeit vollzieht. Nahezu die gesamte für irreversible Strukturänderungen dissipierte Energie wird für Gestaltänderungen aufgewendet. Die Volumenänderungen können als weitgehend elastisch aufgefasst werden.

Für Untersuchungen zur Änderung der elastischen Eigenschaften ist deshalb der *Kompressionsmodul* besonders geeignet. Der Übergang von der stabilen zur instabilen Phase des Tragverhaltens, der durch die Dauerstandfestigkeit definiert ist, kann anhand charakteristischer Änderungen der Kompressionssteifigkeit eindeutig festgestellt werden: Überlastungen der Struktur gehen mit einer zyklenspezifischen Zunahme der Kompressionssteifigkeit einher, was auf instabil voranschreitende Rissprozesse zurückgeführt wird.

Im Ergebnis werden damit zwei Untersuchungsmethoden zur ***Bewertung der Dauerstandfestigkeit von dampfgehärtetem Porenbeton auf der Grundlage von Kurzzeitversuchen*** vorgeschlagen. Beide Methoden stützen sich auf Änderungen der Kompressibilität des Materials. Ergänzende Auswertungen zum Tragverhalten zyklisch beanspruchter Probekörper aus Normalbeton und selbstverdichtendem hochfestem Beton weisen auf analoges Verhalten hin.

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen die Zweckmäßigkeit des angewendeten Untersuchungsprinzips mit *zyklisch eingetragener Beanspruchung* bei Betonen allgemein, wenn die stabile Phase des Tragverhaltens auf der Grundlage von Kurzzeitversuchen eingegrenzt werden soll. Der Vorteil dieser Untersuchungsmethode besteht darin, dass sie auch bei mehrachsigen Beanspruchungen, insbesondere auch bei solchen, bei denen keine Dilatation möglich ist, als Stabilitätskriterium verwendet werden kann. Zur Verifikation dieser Hypothese sind weiterführende mehrachsige Dauerstandversuche und entsprechende Versuche mit niederzyklisch gesteigerter Belastung durchzuführen.

Literaturverzeichnis

Normen

CEB-FIP Model Code 1990 (1991).

DIN EN 206-1. (2001). *Beton. Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.*

DIN EN 678. (1994). *Bestimmung der Trockenrohdichte von dampfgehärtetem Porenbeton.*

DIN EN 679. (2005). *Bestimmung der Druckfestigkeit von dampfgehärtetem Porenbeton.*

DIN 1045-1. (2001). *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton.*

DIN V ENV 1156 (1999). *Holzwerkstoffe. Bestimmung von Zeitstandfestigkeit und Kriechzahl.*

DIN EN 1352 (1997). *Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls unter Druckbeanspruchung von dampfgehärtetem Porenbeton und von haufwerksporigem Leichtbeton.*

DIN EN 1353 (1997). *Bestimmung des Feuchtegehalts von dampfgehärtetem Porenbeton.*

DIN 4223-1 (2003). *Vorgefertigte bewehrte Bauteile aus dampfgehärtetem Porenbeton. Teil 1: Herstellung, Eigenschaften, Übereinstimmungsnachweis.*

DIN EN 12602. (2006). *Vorgefertigte bewehrte Bauteile aus dampfgehärtetem Porenbeton.* Deutsche Fassung prEN 12602:2005. (Entwurf).

DIN EN 12390 T.3. (2002). *Prüfung von Festbeton. Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern.*

DIN 16887. (1990). *Prüfung von Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen. Bestimmung des Zeitstand-Innendruckverhaltens.*

DIN 53769. (1986). *Prüfung von Rohrleitungen aus glasfaserverstärkten Kunststoffen. Teil 2: Zeitstand-Innendruckversuch an Rohren.*

Weiteres Schrifttum

Al-Kubaisy, M.A., Young, A.G. (1975). *Failure of concrete under sustained tension.* Magazine of Concrete Research 27, 171-178.

Altenbach, H., Altenbach, J., Zolčevsky, A. (1995). *Erweiterte Deformationsmodelle und Versagenskriterien der Werkstoffmechanik.* Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.

Aroni, S., Wittmann, F. H. et al. (1993). *Autoclaved Aerated Concrete. Properties, Testing and Design.* RILEM Technical Committees 78-MCA and 51-ALC. London: E & FN SPON.

Awad, M.E., Hilsdorf, H.K. (1974). *Strength and deformation characteristics of plain concrete subjected to high repeated and sustained stresses.* Abeles Symposium on Fatigue of Concrete. American Concrete Institute, SP 41, 1-13.

Backhaus, G. (1983). *Deformationsgesetze.* Berlin: Akademie-Verlag.

Basche, H. D., Kliver, J., Schneider, H. (2003). *Das Querdehnungsverhalten hochfester und ultrahochfester Betone.* Beton- und Stahlbetonbau 98, Heft 9, 539-544.

Berg, O. A. (1968). *Die Hauptentwicklungsrichtungen der Theorie der Festigkeit und Verformung des Betons.* Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Dresden, 17, 1489-1496.

- Berg, O. A., Scerbakov, E. N., Pisanko, G. N. (1971). *Vysokoprocnyj Beton* (Hochfester Beton). Moskau: Strojizdat.
- Betonkalender (2002). *Taschenbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau sowie die verwandten Fächer*. Schriftleitung: J. Eibl. Berlin: Ernst & Sohn
- Bischoff, P.H., Bachmann, H., Eibl, J. (1991). *Microcrack development during high strain rate loading of concrete in compression*. Proceedings of the European Conference on Structural Dynamics, Eurodyn 1990, Bochum, 227-234, Rotterdam: Balkema.
- Bischoff, P.H., Perry, S.H. (1991). *Compressive Behaviour of Concrete at High Strain Rates*. Materials and Structures, Vol. 24, 425-450.
- Bischoff, P. H., Perry, S. H. (1995). *Impact Behaviour of Plain Concrete Loaded in uniaxial Compression*. Journal of Engineering Mechanics ASCE, Vol. 121, No. 6, 685-693.
- Blaschke, F. (1993). *Zugtragverhalten von Beton*. Dissertation, Gesamthochschule Kassel.
- Bockhold, J., Stangenberg, F. (2004). *Modellierung des Nichtlinearen Kriechens von Beton*. Beton- und Stahlbetonbau 99, Heft 3, 209-216.
- Bockhold, J. (2005). *Modellbildung und numerische Analyse nichtlinearer Kriechprozesse in Stahlbetonkonstruktionen unter Schädigungsaspekten*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum.
- Bolle, G. (1999). *Zur Bewertung des Belastungsgrades biegebeanspruchter Stahlbetonkonstruktionen anhand von Last-Verformungs-Informationen*. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar.
- Bongers, J.P.W. (1998). *Multilevel analysis of concrete in multiaxial compression*. In: Computational Modelling of Concrete Structures. 347-354, Rotterdam: Balkema.
- Brandtzaeg, A. (1927). *Failure of Material Composed of Non-Isotropic Elements: An Analytical Study with special Application to Concrete*. Det Kongelige Norske Videnskabers Selskabs Skrifter, Nr. 2, 1-68.
- Briesemann, D. (1975). *Prismen- und Zylinderdruckfestigkeit des dampfgehärteten Gasbetons*. Beton, Heft 12, 419-421.
- Briesemann, D. (1976). *Einfluss der Feuchtigkeit auf die Druckfestigkeit dampfgehärteten Gasbetons*. Cement and Concrete Research 6 (4), 561-569.
- Brühwiler, E., Wang, J., Wittmann, F.H. (1990). *Fracture of AAC as influenced by specimen dimension and moisture*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 2, No. 3, 136 – 146.
- Curbach, M. (1987). *Festigkeitssteigerung von Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten*. Dissertation. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie. Universität Karlsruhe.
- Daschner, F., Zilch, K. (2001). *Kriechen von unbewehrtem Porenbeton*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 518. Berlin: Beuth.
- Desayi, P., Viswanatha, C. S. (1967). *True ultimate strength of plain concrete*. Rilem Bulletin 36, 163-173.
- Dhir, R.K., Sangha, C.M. (1972). *A study of the relationships between time, strength, deformation and fracture of plain concrete*. Magazine of Concrete Research, Vol. 24, No. 81, 197-208.
- Diaz, S.I., Hilsdorf, H.K. (1971). *Fracture mechanism of concrete under static, sustained and repeated compressive loads*. Civil Engineering Studies, Structural Research Series No. 382, University of Illinois, Urbana.

- Ebel, L. (1999). *Tragfähigkeit von Porenbeton unter Teilflächenbelastung*. 37. DAfStb-Forschungskolloquium. Bauhaus-Universität Weimar, Tagungsband, 15-22.
- Eibl, J., Schmidt-Hurtienne, B. (1998). *Stress history versus strain history*. In: Computational Modeling of Concrete Structures. 613-622, Rotterdam: Balkema.
- Eibl, J., Schmidt-Hurtienne, B. (1999). *Betonstoffgesetze für hochdynamische Beanspruchungen*. Beton- und Stahlbetonbau 94, 278-288.
- Freudenthal, A. M. (1955). *Inelastisches Verhalten von Werkstoffen*. Berlin: VEB Verlag Technik.
- Freudenthal, A. M., Roll, F. (1958). *Creep and Creep Recovery of Concrete and High Compressive Stress*. Journal of the American Concrete Institute. Vol. 54, No. 12.
- Gaede, K. (1962). *Versuche über die Festigkeit und die Verformung von Beton bei Druck-Schwellbeanspruchung*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 144. Berlin: Ernst & Sohn.
- Glücklich, J. (1965). *The Effect of Microcracking on Time Dependent Deformations and the Longterm Strength of Concrete*. Proceedings of the International Conference on the Structure of Concrete, 176-189. London: Cement and Concrete Association.
- Grabiec, K., Mroczkowski, M., Witkowski, Z. (1973). *Verformungskennlinien des Gasbetons*. 5. Internationale Baustoff- und Silikattagung ibausil Weimar, Sektion 1, Teil 2, 7-17.
- Gross, D., Seelig, Th. (2001). *Bruchmechanik mit einer Einführung in die Mikromechanik*. 3. Auflage. Berlin: Springer.
- Grübl, P., Weigler, H., Karl, S. (2001). *Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Gundlach, H. (1973). *Dampfgehärtete Baustoffe*. Wiesbaden: Bauverlag GmbH.
- Hampe, E., Raue, E. & Kaller, W. (1993). *Stahlbeton. Teil 1: Grundlagen*. Berlin: Verlag für Bauwesen GmbH.
- Han, N., Walraven, J.C. (1993). *Sustained loading effects in high strength concrete*. High Strength Concrete, Lillehammer, Vol. 2, 1076-1083.
- Hauser, A., Eggenberger, U., Mumenthaler, Th. (1999). *Fly ash from cellulose industry as secondary raw material in autoclaved aerated concrete*. Cement and Concrete Research 29, 297-302.
- Häußler-Combe, U. (2006). *Dreiaxiale Stoffgesetze für Beton – Grundlagen, Formulierungen, Anwendungen*. Zu Ehren von Prof. Josef Eibl aus Anlass seines 70. Geburtstages. Beton- und Stahlbetonbau 101, Heft 3, 175-186.
- Heidolf, T. (2007). *Zeit- und beanspruchungsabhängiges Tragverhalten von polymermodifiziertem Beton unter mehrfach wiederholter Beanspruchung*. Dissertation (eingereicht), Bauhaus-Universität Weimar.
- Hellesland, J., Green, R. (1972). *A Stress and Time dependent Strength law for Concrete*. Cement and Concrete Research, Nr. 2, 261-275.
- Henseleit, O. (1983). *Spannungsdehnungslinie von Gasbeton bei hoher Belastungsgeschwindigkeit*. Forschungsbericht T 1240, Universität Karlsruhe, Stuttgart: IRB Verlag.
- Houst, Y., Alou, F., Wittmann, F.H. (1983). *Influence of moisture content on mechanical properties of autoclaved aerated concrete*. In Wittmann, F.H. (1983). Autoclaved aerated concrete, moisture and properties, 219-234. Amsterdam: Elsevier.

- Hsu, T.T.C., Slate, F.O. (1963). *Tensile strength between aggregate and cement paste or mortar*. Proc. Amer. Concr. Inst. 60 Nr. 4. 465-485.
- Iravani, S., MacGregor, J. (1998). *Sustained Load Strength and Short-Term Strain Behavior of High-Strength Concrete*. ACI Materials Journal, 636-647.
- John, U., Schober, G. (1994). *Beitrag zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Porenbeton*. Bauingenieur 69, 43-46.
- Jones, R. (1952). *A method for studying the formation of cracks in a material subjected to stress*. British Journal of Applied Physics, Vol. 3, No. 7, 229-232.
- Karsan, I. D., Jirsa, J. O. (1969). *Behavior of concrete under compressive loadings*. Journal of the Structural Division, ASCE 95, 2543-2563.
- Klausen, D. (1978). *Festigkeit und Schädigung von Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt.
- Klemt, K. (2000). *Detektion von Gefügeveränderungen im Beton bei Druckbeanspruchung mittels Ultraschall-Transmission*. 39. DAfStb-Forschungskolloquium, 159-170.
- Kordina, K., Schubert, L., Troitzsch, U. (2000). *Kriechen von Beton unter Zugbeanspruchung*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 498. Berlin: Beuth.
- Kotsovos, M. D. (1980). *A mathematical Model of the Deformational Behaviour of Concrete under Generalized Stress Based on Fundamental Material Properties*. Materials & Structures 13, Nr. 76, 289-298.
- Kotsovos, M. D. (1983). *Effect of testing techniques on the post-ultimate behaviour of concrete in compression*. Materials & Structures 16, Nr. 91, 3-12.
- Kupfer, H. (1973). *Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 229, Berlin: Ernst & Sohn.
- Linse, D., Stegbauer, A. (1976a). *Festigkeit und Verformungsverhalten von Beton unter hohen zweiachsigen konstanten Dauerbelastungen und Dauerschwellbelastungen*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 254. Berlin: Ernst & Sohn.
- Linse, D., Stegbauer, A. (1976b). *Festigkeit und Verformungsverhalten von Leichtbeton, Gasbeton, Zementstein und Gips unter zweiachsigen Kurzzeitbeanspruchungen*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 254. Berlin: Ernst & Sohn.
- Lusche, M. (1972). *Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchtem Normal- und Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge*. Schriftenreihe der Zementindustrie, 39. Düsseldorf: Beton – Verlag GmbH.
- Mang, H., Hofstetter, G. (2000). *Festigkeitslehre*. Wien: Springer.
- Marzahn, G. (2000). *A Study on the Creep Behavior of Dry-Stacked Masonry Walls and Individual Masonry Units*. Lacer No. 5, 261-278.
- Mazzotti, C., Savoia, M. (2002). *Nonlinear creep, poisson's ratio and creep-damage interaction of concrete in compression*. ACI Materials Journal 99, No. 5, 450-457.
- Mc Creath, D. R., Newman, J.B., Newman, K. (1969). *The influence of aggregate particles on the local strain distribution and fracture mechanism of cement paste during drying, shrinkage and loading to failure*. RILEM, Materials and Structures, Vol. 2, No. 7, 73-84.

- Mehmel, A., Kern, E. (1962). *Elastische und plastische Stauchungen von Beton infolge Druckschwell- und Standbelastung*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 153. Berlin: Ernst & Sohn.
- Mier, van, J. G. M. (1986). *Fracture of Concrete under Complex Stress*. Heron, Vol. 31, Nr. 3.
- Müller, H.S. (1986). *Zur Vorhersage des Kriechens von Konstruktionsbeton*. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe.
- Müller, R.K. (1964). *Der Einfluss der Messlänge auf die Ergebnisse bei Dehnmessungen an Beton*. Beton 64, Heft 5, 205-208.
- Narayanan, N., Ramamurthy, K. (1999). *Microstructural investigations on aerated concrete*. Cement and Concrete Research 30, 457-464.
- Narayanan, N., Ramamurthy, K. (2000). *Structure and properties of aerated concrete: a review*. Cement & Concrete Composites 22, 321-329.
- Nechvatal, D. (1996). *Normalbeton unter hohen Dauerlasten bei verhindertem Feuchteaustausch*. Dissertation, TU München.
- Newman, K. (1964). *Concrete control tests as measures of the properties of concrete*. Proceedings of a Symposium on Concrete Quality, London, Cement and Concrete Association, 120-138.
- Nielsen, A. (1983). *Shrinkage and creep – deformation parameters of aerated, autoclaved concrete*. In Wittmann, F.H. (1983). Autoclaved aerated concrete, moisture and properties, 189-206. Amsterdam: Elsevier.
- Opitz, H. (1968). *Festigkeit und Verformungseigenschaften des Betons bei zweiachsiger Druckbeanspruchung*. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden, Band 17, Heft 6, 1520-1523.
- Ostrat, L., Juurvee, U. (2003). *Investigation of the wetting expansion and drying shrinkage of autoclaved aerated concrete*. 15. Ibautil, Tagungsband 2, 449-453.
- Plannerer, M. (1998). *Temperaturspannungen in Betonbauteilen während der Erhärtung*. Berichte aus dem Baustoffinstitut, Heft 2, TU München.
- Plotzitza, A. (2002). *Ein Verfahren zur numerischen Simulation von Betonstrukturen beim Abbruch durch Sprengen*. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe.
- Pölling, R. (2000). *Eine praxisnahe, schädigungsorientierte Materialbeschreibung von Stahlbeton für Strukturanalysen*. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum.
- Probst, P., Stöckl, S. (1978). *Kriechen und Rückkriechen von Beton nach langer Lasteinwirkung*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 295. Berlin: Ernst & Sohn.
- Rasch, Ch. (1962). *Spannungs-Dehnungs-Linien des Betons und Spannungsverteilung in der Biegedruckzone bei konstanter Dehngeschwindigkeit*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 154. Berlin: Ernst & Sohn.
- Rasch, Ch. (1967). *Experimentelle Bestimmung der Spannungsverteilung in der Biegedruckzone*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 191. Berlin: Ernst & Sohn.
- Raue, E., Ebel, L. (1995). *Teilflächenbelastung an Porenbeton*. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. unveröffentlicht, Bauhaus-Universität Weimar.
- Raue, E., Wehr, G., Maruschky, R. (2000a). *Untersuchungen zum Bruchwiderstand von Porenbeton unter räumlicher Beanspruchung*. 14. Internationale Baustofftagung „ibautil“ Weimar, Tagungsbericht, Band 2, 909-918.

- Raue, E., Wehr, G., Schölzel, T. (2000b). *Untersuchungen zur Bruchenergie und zum Entfestigungsverhalten von Porenbeton*. Thesis 46, Heft 3, 58-70.
- Raue, E., Wehr, G., Tartsch, E. (2000c). *Untersuchungen zum Verhalten von Porenbeton unter zyklischer Beanspruchung*. Thesis 46, Heft 3, 48-56.
- Raue, E., Schwabach, E., Stark, J., Erfurt, W. (2003). *Verformungsverhalten und Schädigungsentwicklung von selbstverdichtendem Beton infolge zyklischer Druckbeanspruchung*. 15. Internationale Baustofftagung „ibausil“ Weimar, Tagungsbericht, Band 2, 581-592.
- Raue, E., Tartsch, E. (2005). *Experimental Results of fatigue and sustained load tests on Autoclaved Aerated Concrete*. Journal of Civil Engineering and Management. Vol. XI., No 2, 121-127.
- Reiner, M. (1968). *Rheologie in elementarer Darstellung*. Leipzig: Fachbuchverlag.
- Reinhardt, H.W., Stroeven, P., den Uijl, J.A., Kooistra, T.R., Vrencken, J.H.A.M. (1978). *Einfluß von Schwingbreite, Belastungshöhe und Frequenz auf die Schwingfestigkeit von Beton bei niedrigen Bruchlastwechselzahlen*. Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 9, 498-503.
- Rinder, T. (2003). *Hochfester Beton unter Dauerzuglast*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 544. Berlin: Beuth.
- Roelfstra, P.E., Wittmann, F.H. (1983). *Numerical analysis of drying and shrinkage*. In Wittmann, F.H. (1983). *Autoclaved aerated concrete, moisture and properties*, 235-248. Amsterdam: Elsevier.
- Rogge, A. (2003). *Materialverhalten von Beton unter mehrachsiger Beanspruchung*. Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, TU München.
- Ross, C.A., Jerome, D.M., Tedesco, J.W., Hughes, M.L. (1996): *Moisture and Strain Rate Effects on Concrete Strength*. ACI Materials Journal 93, 293-300.
- Rüsch, H. (1959). *Physikalische Fragen der Betonprüfung*. Zement-Kalk-Gips, Jg. 12, Heft 1, 1-9.
- Rüsch, H. (1960). *Researches towards a General Flexural Theory for Structural Concrete*. American Concrete Institute Journal, Vol. 57, 1-28.
- Rüsch, H., Sell, R., Rasch, C., Grasser, E., Hummel, A., Wesche, K., Flatten, H. (1968). *Festigkeit und Verformung von unbewehrtem Beton unter konstanter Dauerlast*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 198. Berlin: Ernst & Sohn.
- Rüsch, H., Stöckl, S. (1969). *Versuche zur Festigkeit der Biegedruckzone. Einflüsse der Querschnittsform*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 207. Berlin: Ernst & Sohn.
- Sawin, G. N. (1956). *Spannungserhöhung am Rande von Löchern*. Berlin: VEB Verlag Technik.
- Schickert, G. (1980). *Schwellenwerte beim Betondruckversuch*. Bericht der Bundesanstalt für Materialprüfung Berlin. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 312. Berlin: Ernst & Sohn.
- Schickert, G. (1981). *Formfaktoren der Betondruckfestigkeit*. Die Bautechnik 58, Heft 2, 52-57.
- Schlechte, E. (1981). *Festigkeitslehre für Bauingenieure*. 4. Auflage. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen.
- Schleeh, W. (1975a). *Theorie und Praxis bei der Druckfestigkeitsprüfung*. Beton, Heft 4, 132-138.
- Schleeh, W. (1975b). *Die Spannungszustände in den Versuchskörpern zur Ermittlung der Betondruckfestigkeit*. Beton- und Stahlbetonbau 8, 194-201.
- Scholz, G. (1961). *Theoretische Auswertung von Heft 120 – Festigkeit der Biegedruckzone*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 139.

- Schorf, H., Hempel, R., Butler, M., Schiek, M. (2003). *Dauerhaftigkeit von textildbewehrtem Beton mit AR-Glas-Multifilamentgarn aus physiko-chemischer Sicht*. 15. Ibaustil, Tagungsband 2, 259-270.
- Schubert, P. (1983). *On the shrinkage behaviour of aerated Concrete*. In Wittmann, F.H. (1983). *Autoclaved aerated concrete, moisture and properties*, 207-218. Amsterdam: Elsevier.
- Schubert, P., Schmidt, St. (1990). *Zum Einfluss des Feuchtegehaltes von Mauersteinen auf deren Druckfestigkeit*. Mauerwerk-Kalender 15, 499-505. Berlin: Ernst & Sohn.
- Schubert, P., Schmidt, U. (2002). *Untersuchungen zur Ermittlung eines Formfaktors zwischen der Druckfestigkeit von Würfeln mit 100 mm Kantenlänge und der von Porenbeton-Plansteinen verschiedener Höhe*. Forschungsbericht F 6034. Institut für Bauforschung, Aachen.
- Schwabach, E. (2005). *Verformungs- und Degradationsverhalten von niederzyklisch uniaxial druckbeanspruchtem Beton*. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar.
- Sell, R., Zelger, C. (1969). *Versuche zur Dauerstandfestigkeit von Leichtbetonen*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 207. Berlin: Ernst & Sohn.
- Sell, R. (1970). *Festigkeit und Verformung von Gasbeton unter zweiachsialer Druck-Zug-Beanspruchung*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 209. Berlin: Ernst & Sohn.
- Shah, S. P., Chandra, S. (1968). *Critical Stress, Volume Change and Microcracking of Concrete*. ACI-Journal, 770-781.
- Shen, J.-H. (1992). *Lineare und nichtlineare Theorie des Kriechens und der Relaxation von Beton unter Druckbeanspruchung*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 432. Berlin: Beuth.
- Shkoukani, H., Walraven, J. (1991). *Sustained tensile strength of concrete*. IABSE Colloquium Structural Concrete, Bd. 62, 725-729. Stuttgart.
- Siebel, E. (1989). *Verformungsverhalten, Energieaufnahme und Tragfähigkeit von Normal- und Leichtbeton im Kurzzeitdruckversuch*. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 50.
- Siebel, E., Wischers, G. (1989a). *Verformungsverhalten und Energieaufnahme von Normal- und Leichtbeton im Kurzzeitdruckversuch*. Betontechnische Berichte, Beton, Heft 7, 303-307.
- Siebel, E., Wischers, G. (1989b). *Verformungsverhalten und Energieaufnahme von Normal- und Leichtbeton im Kurzzeitdruckversuch*. Betontechnische Berichte, Beton, Heft 8, 341-346.
- Sigvaldason, O. T. (1964). *The influence of the testing machine on the compressive strength of concrete*. London, Cement and concrete association, Proceedings 162-171.
- Sinha, B. P., Gerstle, K. H., Tulin, L. G. (1964). *Stress-Strain Relations for Concrete under cyclic loading*. ACI Journal, Vol. 61.
- Skrzypek, J. J., Hetnarski, R. B. (1993). *Plasticity and Creep*. Theory, Examples and Problems. London: CRC Press.
- Smadi, M., Slate, F. O., Nilson, A. H. (1985). *High-, Medium-, and Low-Strength Concretes Subject to Sustained Overloads – Strains, Strengths, and Failure Mechanisms*. ACI Journal, V. 82, No. 5, 657-664.
- Smadi, M., Slate, F. O. (1989). *Microcracking of High and Normal Strength Concretes under Short- and Long-Term Loadings*. ACI Materials Journal, V. 86, No. 2, 117-127.
- Sobotka, Z. (1984). *Rheology of Materials and Engineering Structures*. Prague: Academia.
- Spooner, D. C. (1972). *The stress-strain relationship for hardened cement pastes in compression*. Magazine of Concrete Research 24, No. 79. 85-92.

- Spooner, D. C., Dougill, J. W. (1975). *A quantitative assessment of damage sustained in concrete during compressive loading*. Magazine of Concrete Research, 27, H. 92, 151-160.
- Spooner, D. C., Pomeroy, C. D., Dougill, J. W. (1976). *Damage and energy dissipation in cement pastes in compression*. Magazine of Concrete Research 28, No. 94. 21-29.
- Streit, W. (1991). *Zeitabhängige Verformungen von Beton infolge hoher Druckbeanspruchungen*. Dissertation, Technische Universität München.
- Suaris, W., Fernando, V. (1987). *Detection of crack growth in concrete from ultrasonic intensity measurements*. Materials and Structures 20, No. 117, 214-220.
- Swamy, R.N. (1971). *Study of the micro-mechanical behaviour of concrete using reflective photoelasticity*. Materials and Structures, Vol. 4, No. 24, 357-370.
- Taheri, Z., Hazivar, W. (1986). *Der Zylinder unter starrem Stempel*. Bautechnik, Heft 8, 266-270. Berlin: Ernst & Sohn.
- Taylor, M.A., Broms, B.B. (1964). *Shear Bond Strength between Coarse Aggregate and Cement Paste or Mortar*. ACI, Proceedings 61, 939-957.
- Teéni, M. (1969). *Deformation modes and structural parameters in cemented granular systems*. Symposium on Materials, Southampton, Paper 44a.
- Trost, H. (1966). *Spannungs-Dehnungs-Gesetz eines viskoelastischen Festkörpers wie Beton und Folgerungen für Stabtragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton*. Beton, Jg. 16, Nr. 6, 233-248.
- Weigler, H., Freitag, W. (1975). *Dauerschwell- und Betriebsfestigkeit von Konstruktions-Leichtbeton*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 247. Berlin: Ernst & Sohn.
- Wesche, K., Krause, K. (1972). *Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul von Beton*. Materialprüfung 14, Heft 7, 212-218.
- Wischers, G. (1967). *Aufnahme der Druckkräfte in Schwerbeton und Leichtbeton*. Beton 17, 183-186.
- Wittenburg, J., Pestel, E. (2001). *Festigkeitslehre*. Ein Lehr- und Arbeitsbuch. 3. Auflage, Berlin: Springer.
- Wittmann, F., Zaitsev, J. (1974). *Verformung und Bruchvorgang poröser Baustoffe bei kurzzeitiger Belastung und Dauerlast*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 232. Berlin: Ernst & Sohn.
- Wittmann, F. (1983). *Autoclaved Aerated Concrete, Moisture and Properties. Developments in Civil Engineering 6*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Zelger, C. (1970). *Liegt der Unterschied zwischen Leichtbeton und Normalbeton nur im Gewicht?* Beton 20, Heft 3, 90-95.
- Zilch, K. et al. (2003). *Erläuterungen zu DIN 1045-1*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 525. Berlin: Beuth.
- Życzkowski, M. (1981). *Combined Loadings in the Theory of Plasticity*. Warschau: PWN-Polish Scientific Publishers.

Anhang

Anhangsverzeichnis

Anhang A: Probekörper aus Porenbeton, Serie 1	127
Anhang B: Probekörper aus Porenbeton, Serie 2	165
Anhang C: Probekörper aus Porenbeton, Serie 3	193
Anhang D: Probekörper aus Normalbeton und selbstverdichtendem hochfestem Beton	225

Anhang A: Probekörper aus Porenbeton, Serie 1

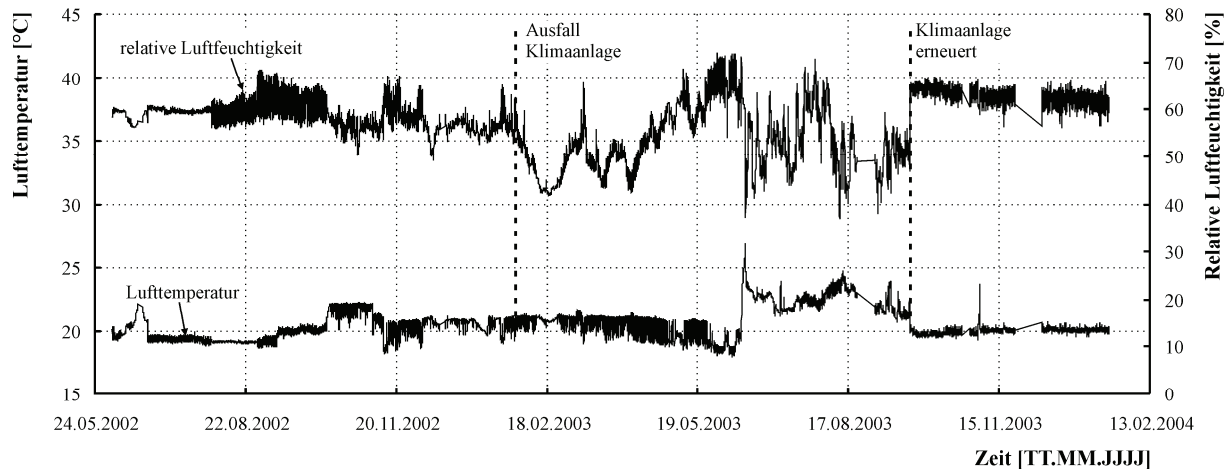


Abb. A1: klimatische Verhältnisse im Versuchszeitraum

Tab. A1: Ergebnisse der kraftgeregelten Kurzzeitversuche, Werte bei maximaler Druckkraft

Probe [Kommentar]	Umfang	Beanspruchungs- geschwindigkeit	Kraft	Spannung	Beanspruchungs- intensität	Längs- dehnung	Quer- dehnung
	u	σ / t	F	σ	$-\sigma / f_{cm}$	ϵ_l	ϵ_q
<i>kraftgeregelt</i>	[mm]	[N/mm ² /s]	[kN]	[N/mm ²]	[%]	[mm/m]	[mm/m]
H 100-01	474	0,015	-115,75	-6,47	101,1	-	-
H 100-02	473	0,015	-113,36	-6,37	99,4	-	-
H 100-03	473	0,015	-116,14	-6,52	101,8	-	-
H 100-04	476	0,015	-114,06	-6,33	98,8	-	-
H 100-05	475	0,015	-112,53	-6,27	97,8	-	-
H 100-06	474	0,015	-114,88	-6,43	100,3	-	-
H 100-07	473	0,015	-115,77	-6,50	101,5	-	-
H 100-08	475	0,015	-114,06	-6,35	99,2	-	-
H 100-09	474	0,015	-114,80	-6,42	100,2	-	-
H 100-10	473	0,015	-113,82	-6,39	99,8	-	-
H 153 [1]	471	0,001	-103,14	-5,84	91,2	-2,83	0,71
H R-100-01 [1]	473	0,015	-113,78	-6,39	99,8	-3,57	1,24
H 100P-01 [1]	473	0,10	-121,26	-6,81	106,3	-3,84	1,51
H 157 [1]	474	10,000	-139,07	-7,78	121,44	-4,29	1,42

[1] nicht für Mittelwert (Kurzzeitdruckfestigkeit) herangezogen

Tab. A2: Ergebnisse der weggeregelten Kurzzeitversuche, Werte bei maximaler Druckkraft

Probe [Kommentar]	Umfang	Beanspruchungs- geschwindigkeit	Kraft	Spannung	Beanspruchungs- intensität	Längs- dehnung	Quer- dehnung
	u	ε / t	F	σ	$-\sigma / f_{cm}$	ε_l	ε_q
weggeregelt	[mm]	[mm/m/s]	[kN]	[N/mm ²]	[%]	[mm/m]	[mm/m]
H 150 [1]	474	0,0002	-103,72	-5,80	-90,6	-2,92	0,98
H 152 [1]	473	0,006	-111,14	-6,24	-97,46	-3,12	0,91

[1] nicht für Mittelwert (Kurzzeitdruckfestigkeit) herangezogen

Tab. A3: Versuchsergebnisse, Endwerte vor Versagen bzw. unmittelbar vor Entlastung

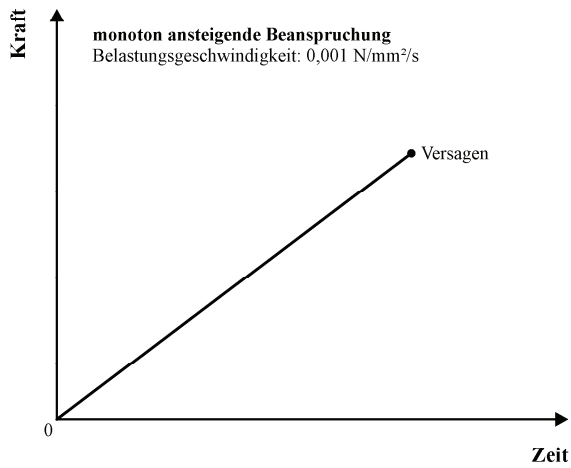
Probe [Kommentar]	Umfang	Kraft	Spannung	Beanspruchungs- intensität	Längs- dehnung	Quer- dehnung	Haltezeit
	u	F	σ	$-\sigma / f_{cm}$	ε_l	ε_q	t
	[mm]	[kN]	[N/mm ²]	[%]	[mm/m]	[mm/m]	[h:min:s]
<i>mit Versagen</i>							
H 95-01	473	-108,79	-6,11	95,4	-3,31	1,08	0:00:50
H 90-01	472	-103,04	-5,81	90,7	-3,15	1,03	0:12:21
H 90-02	473	-102,95	-5,78	90,3	-3,26	1,62	0:20:06
H RS-01 [1]	472	-108,42	-6,12	95,5	-3,40	1,03	0:00:12
H V65-01 [1]	473	-108,45	-6,09	95,1	-3,56	1,18	0:02:01
H 154 [1]	473	-108,13	-6,07	94,8	-3,55	1,11	0:01:27
H 151 [1]	474	-108,05	-6,04	94,4	-3,29	1,07	0:00:33
H 90V-01 [2, 3]	473	-102,92	-5,78	90,3	-2,88	-	0:01:59
H V85-01 [1]	473	-103,00	-5,79	90,3	-2,93	0,76	0:02:00
H V40-01 [1]	473	-102,85	-5,78	90,2	-3,21	1,00	0:07:57
H 155 [1]	474	-97,48	-5,45	85,1	-3,03	0,88	0:14:01
<i>ohne Versagen</i>							
H V40-03	472	-45,86	-2,59	40,4	-1,28	0,24	2505:33:14
H 85-01	473	-97,26	-5,46	85,3	-3,03	0,92	524:09:14
H RS-01 [1]	472	-102,72	-5,79	90,5	-3,10	0,92	0:09:00
H V65-01 [1]	473	-102,80	-5,77	90,1	-3,02	0,78	0:09:00
H 154 [1]	473	-102,47	-5,76	89,9	-3,04	0,81	0:30:00
H 151 [1]	474	-102,40	-5,73	89,4	-3,05	0,93	0:30:00
H V85-01 [1]	473	-97,34	-5,47	85,4	-3,04	0,91	0:09:00
H V40-01 [1]	473	-97,14	-5,46	85,2	-3,10	0,84	0:09:00
H 155 [1]	474	-96,66	-5,41	84,4	-2,63	0,64	0:30:00
H 154 [2]	473	-91,04	-5,11	79,8	-2,46	0,55	2:00:05

[1] zyklisch vorbelastet

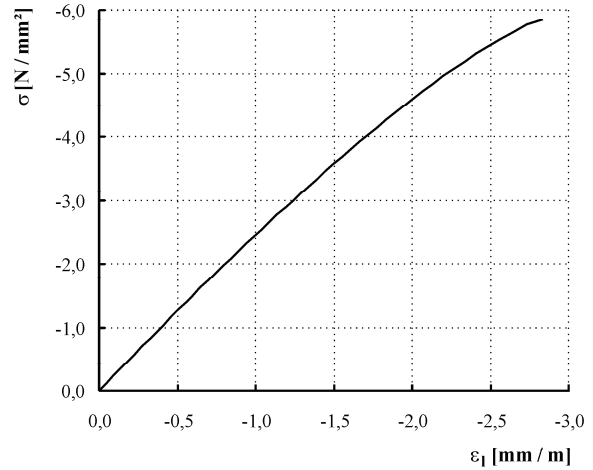
[2] vorbelastet

[3] keine Querverformungen gemessen

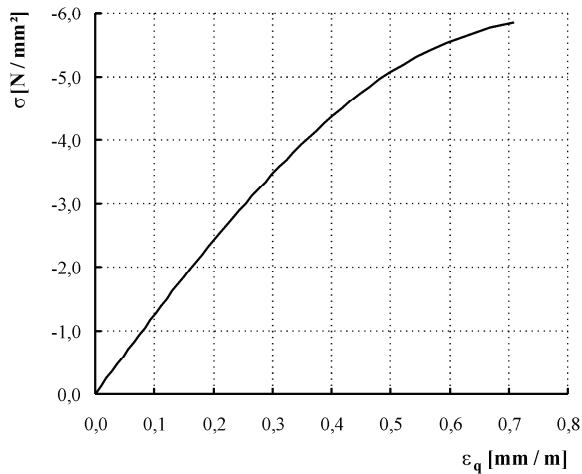
Tafel A1: Probekörper H 153 (Porenbeton P4.4)



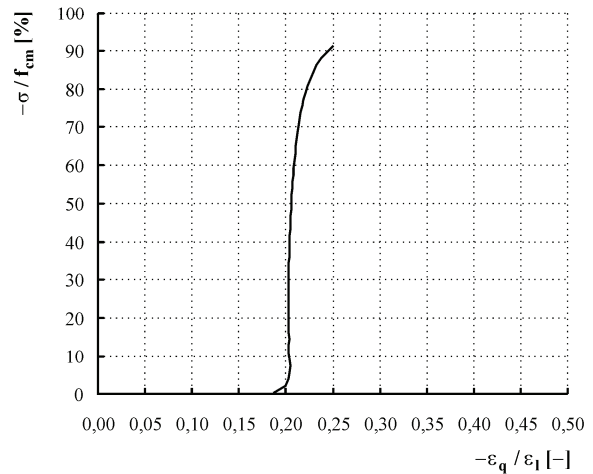
a) Belastungsregime, ergänzende Bemerkungen



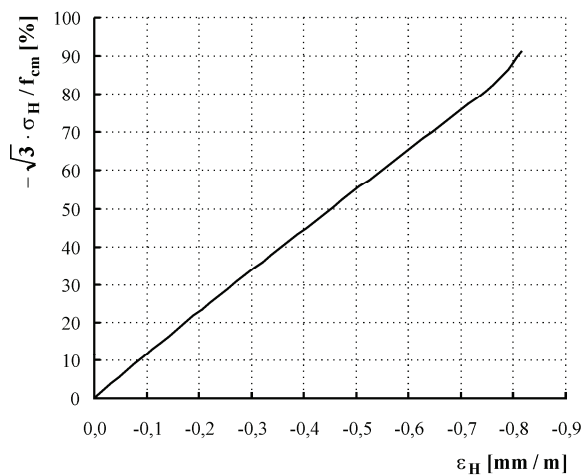
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



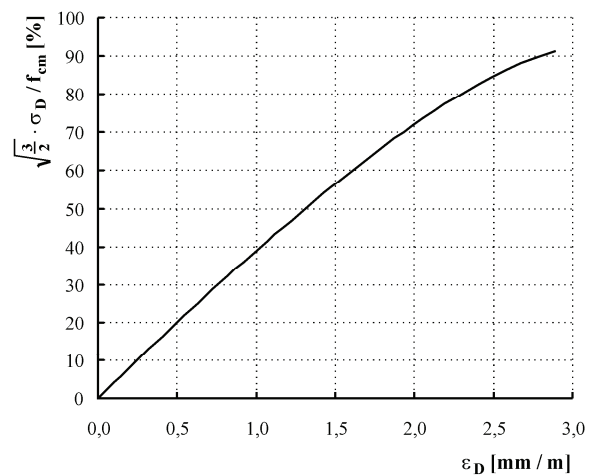
c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



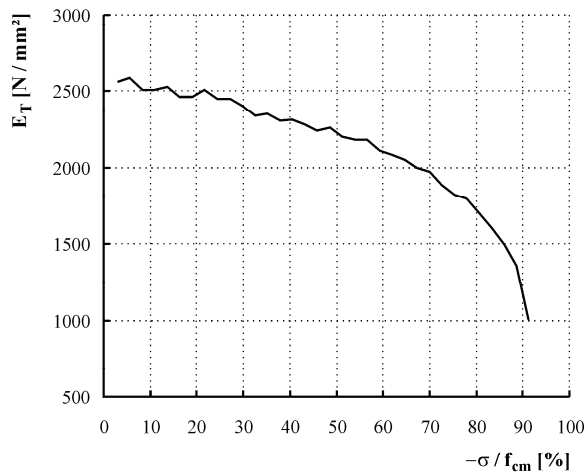
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



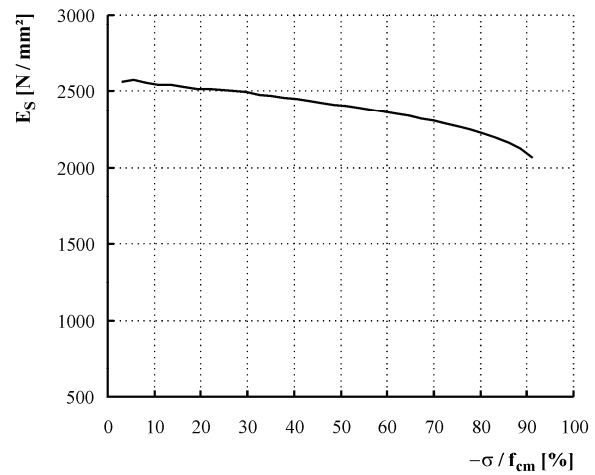
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel A1: Probekörper H 153 (Porenbeton P4.4)

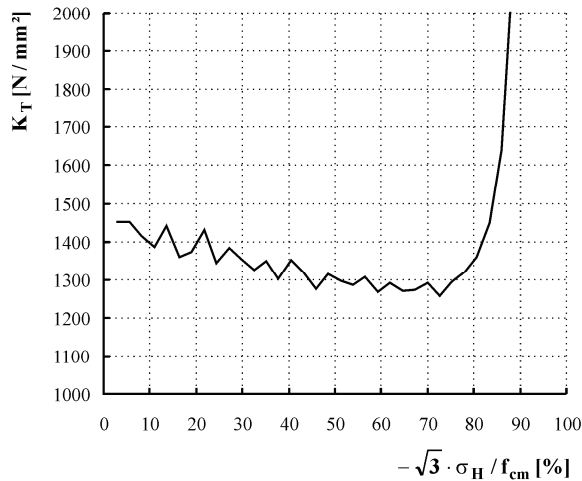
- Fortsetzung -



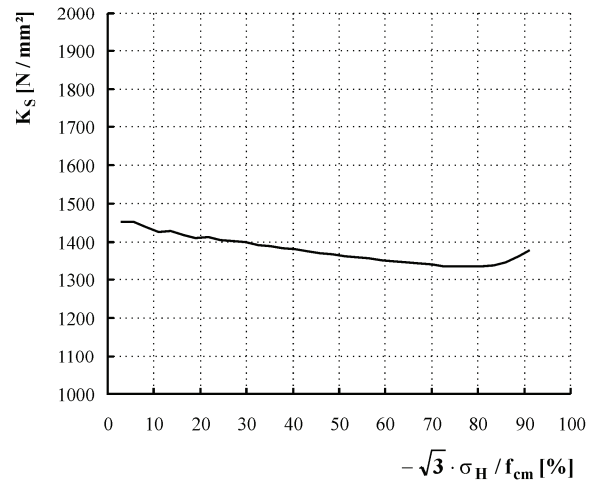
g) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



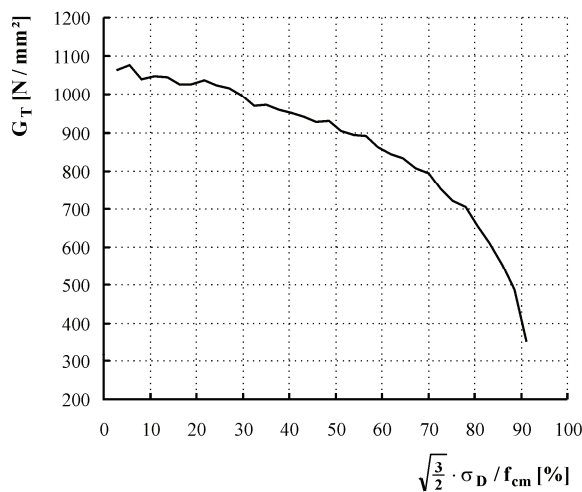
h) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)



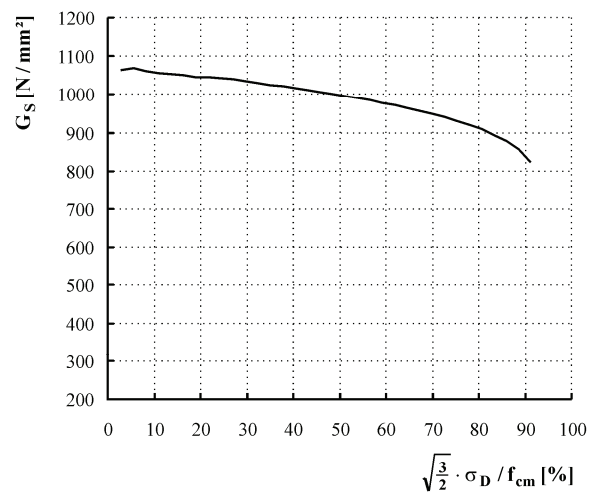
i) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



j) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

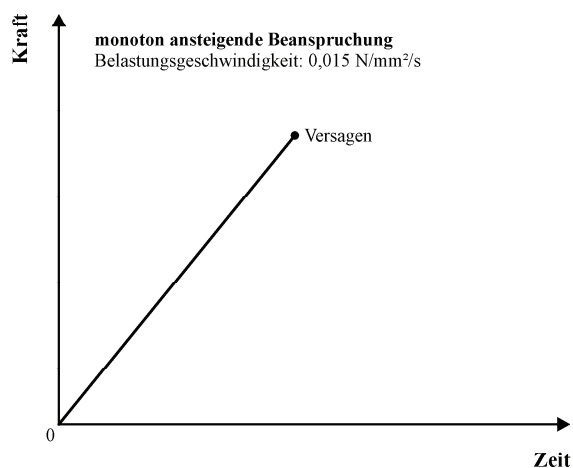


k) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)

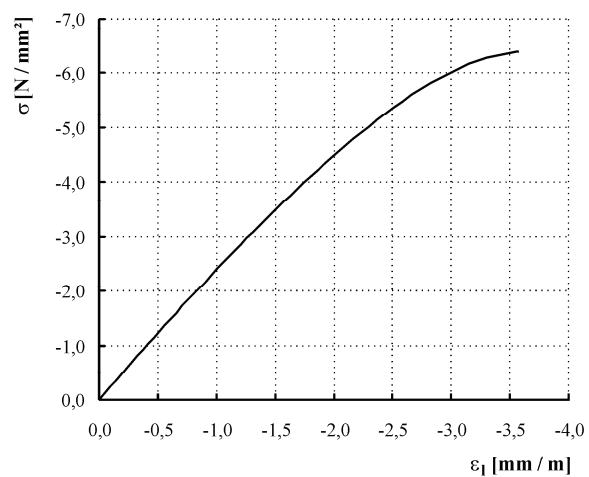


l) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

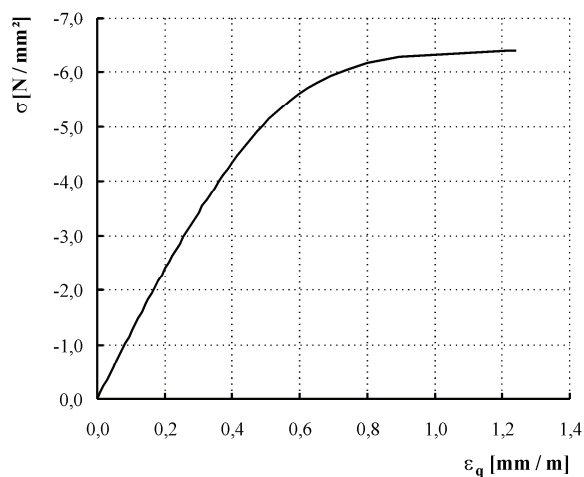
Tafel A2: Probekörper H R-100-01 (Porenbeton P4.4)



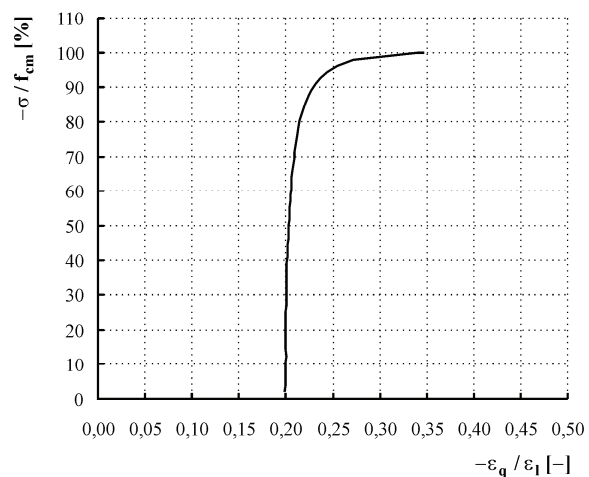
a) Belastungsregime, ergänzende Bemerkungen



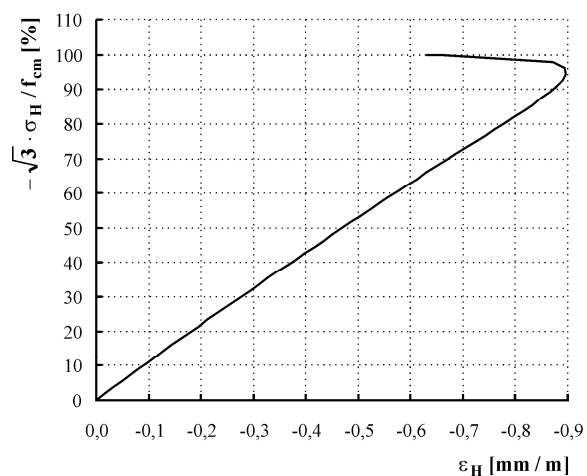
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



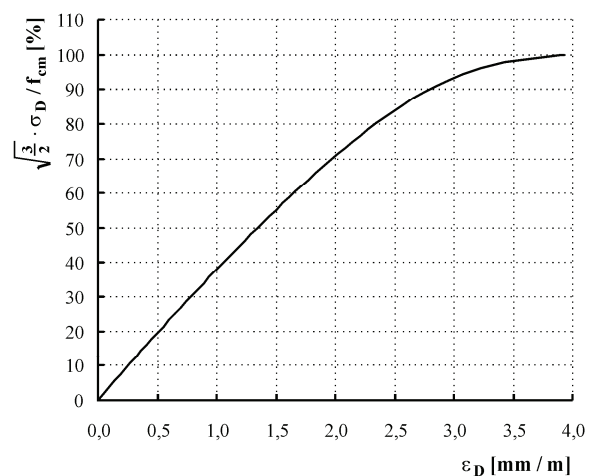
c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



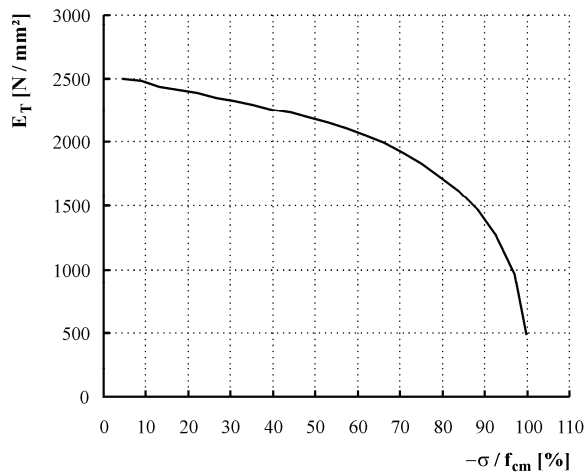
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



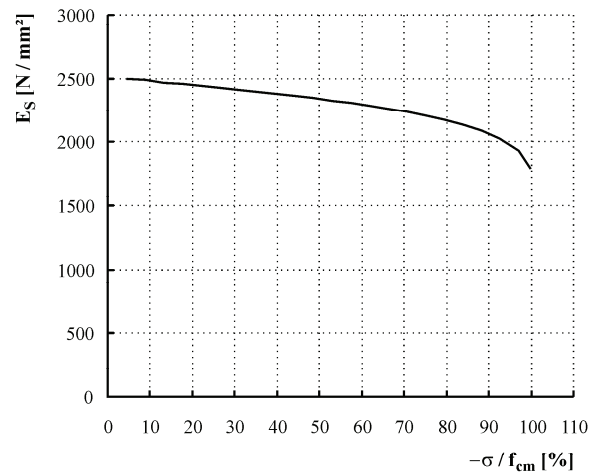
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel A2: Probekörper H R-100-01 (Porenbeton P4.4)

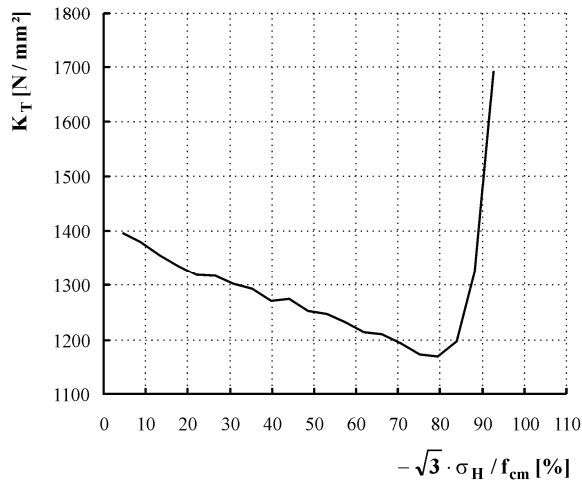
- Fortsetzung -



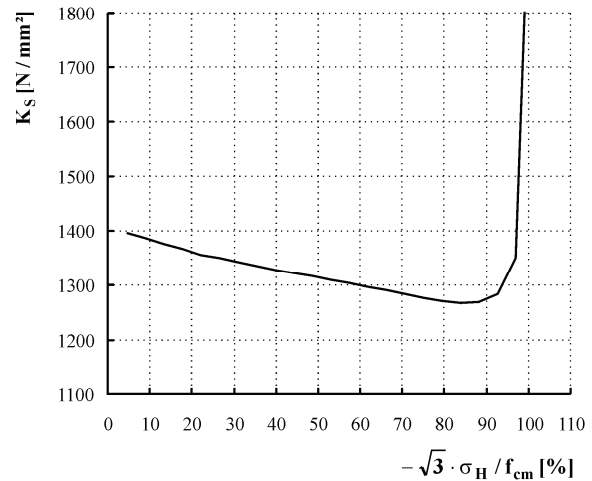
g) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



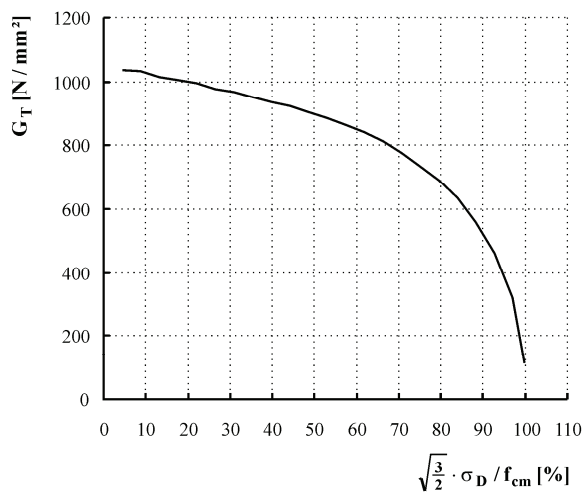
h) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)



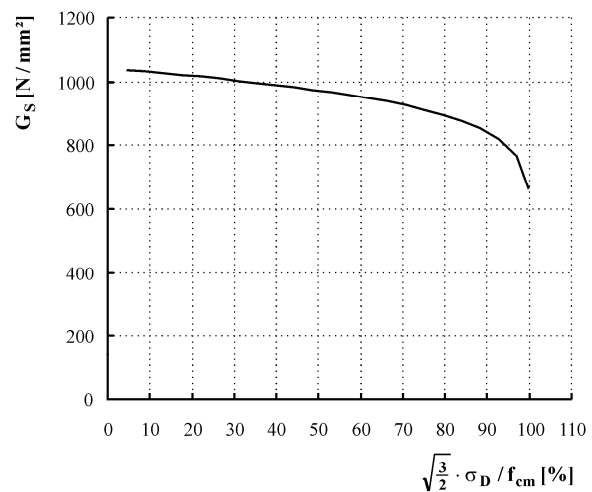
i) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



j) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

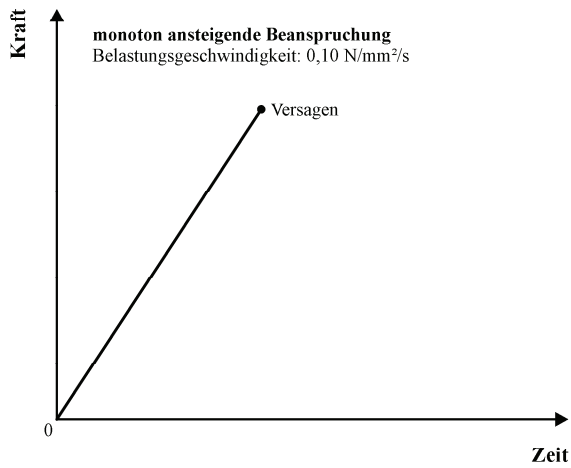


k) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)

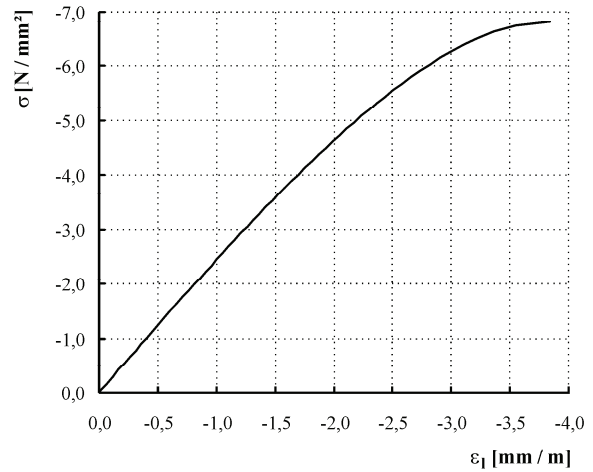


l) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

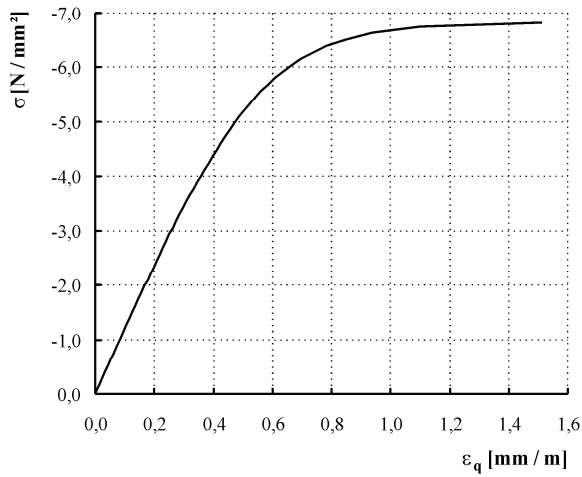
Tafel A3: Probekörper H 100P-01 (Porenbeton P4.4)



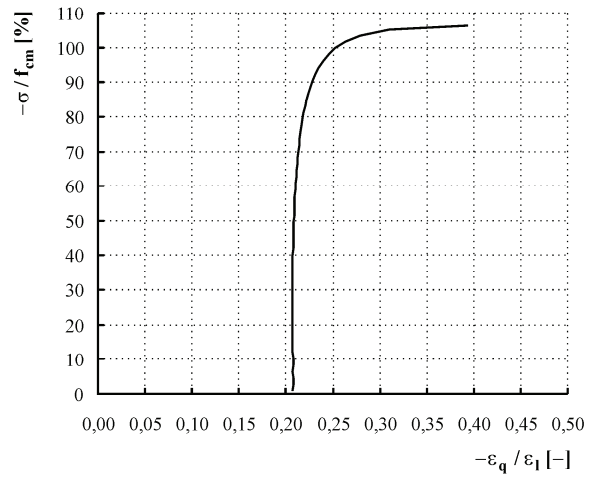
a) Belastungsregime, ergänzende Bemerkungen



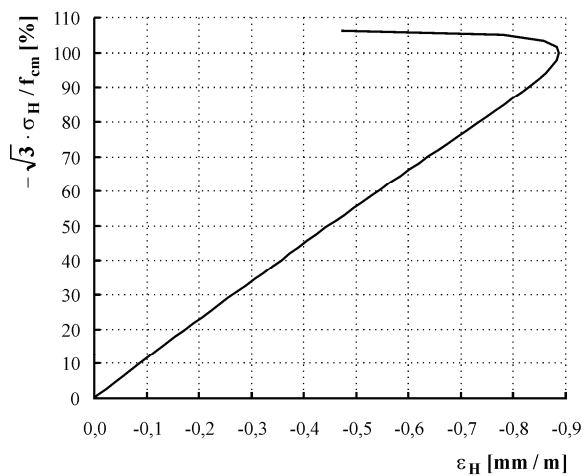
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



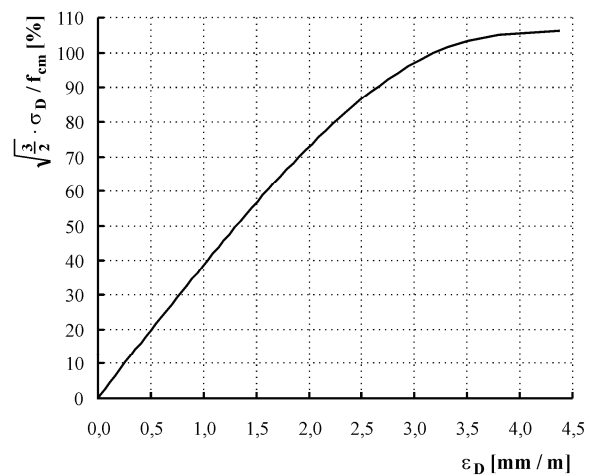
c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



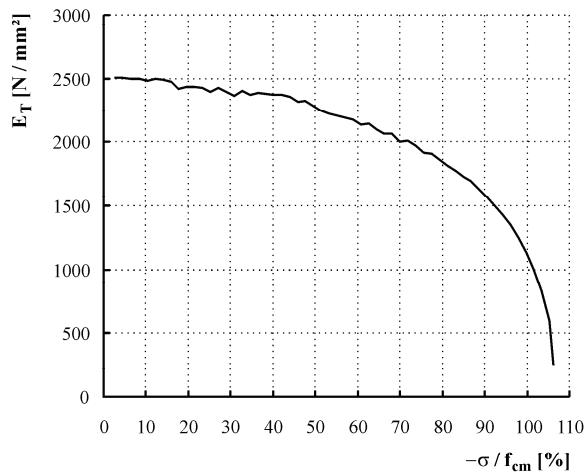
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



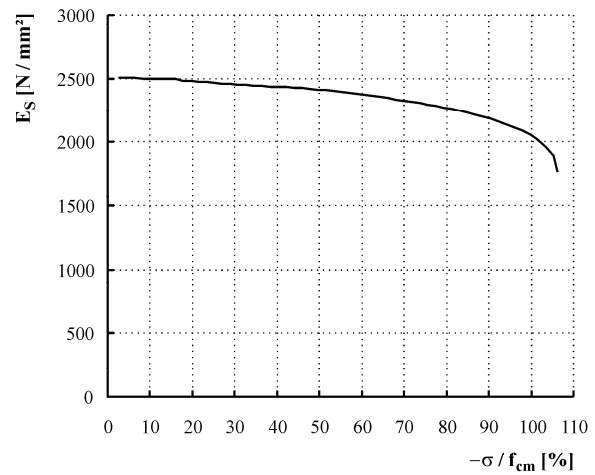
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel A3: Probekörper H 100P-01 (Porenbeton P4.4)

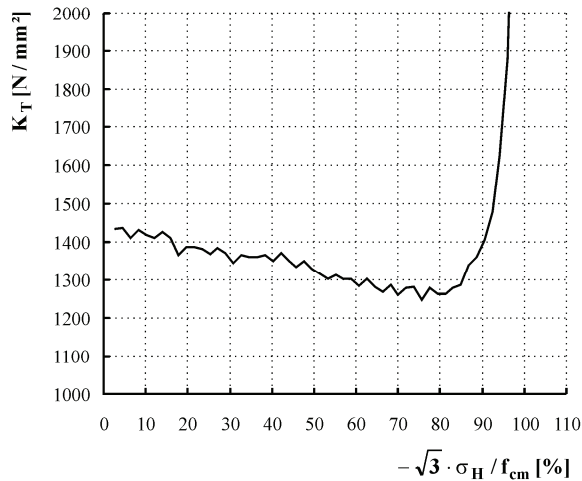
- Fortsetzung -



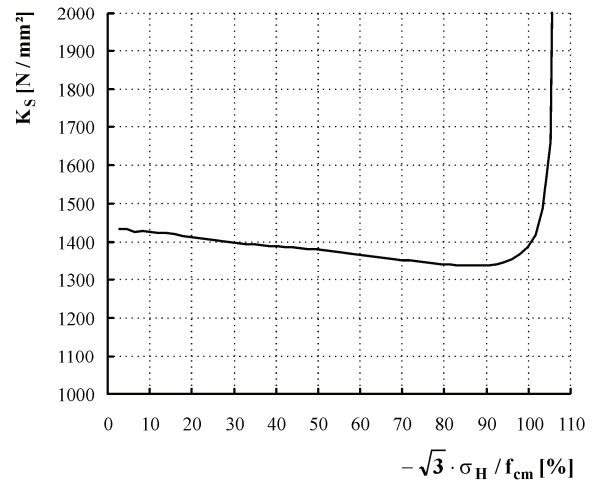
g) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



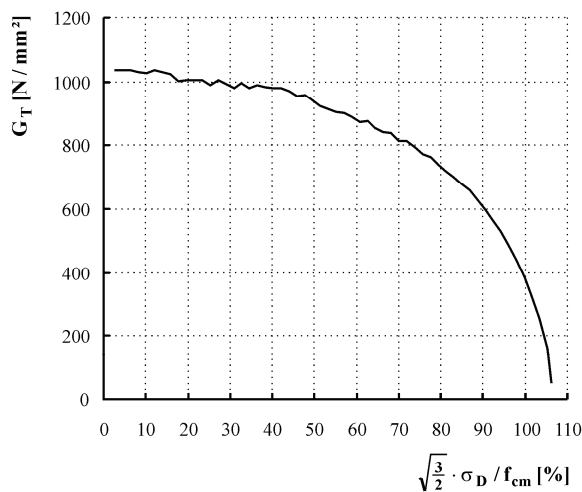
h) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)



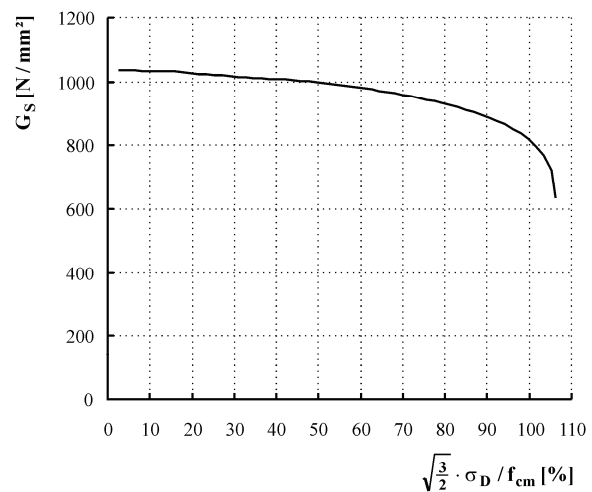
i) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



j) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

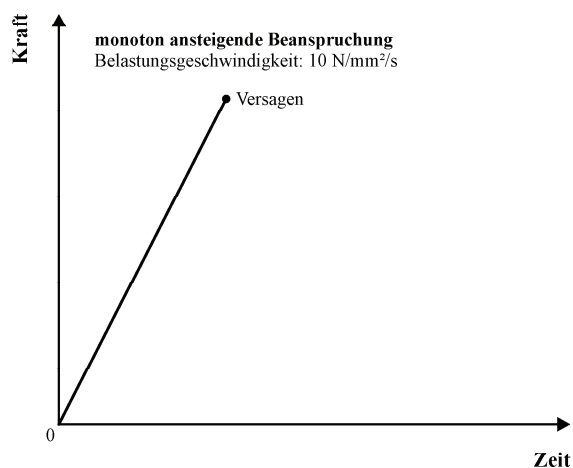


k) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)

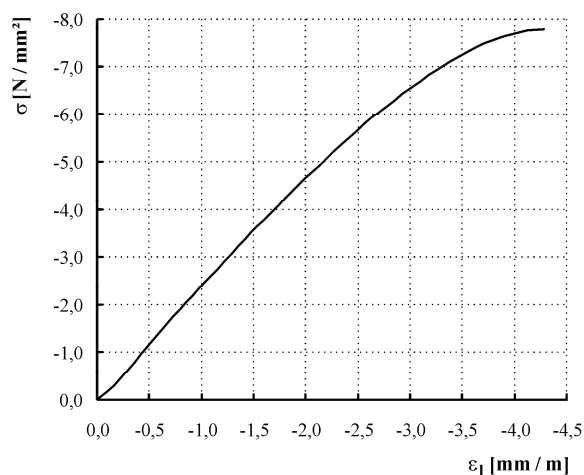


l) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

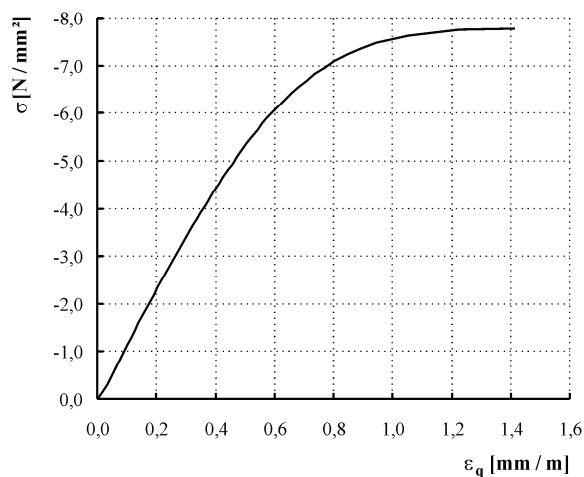
Tafel A4: Probekörper H 157 (Porenbeton P4.4)



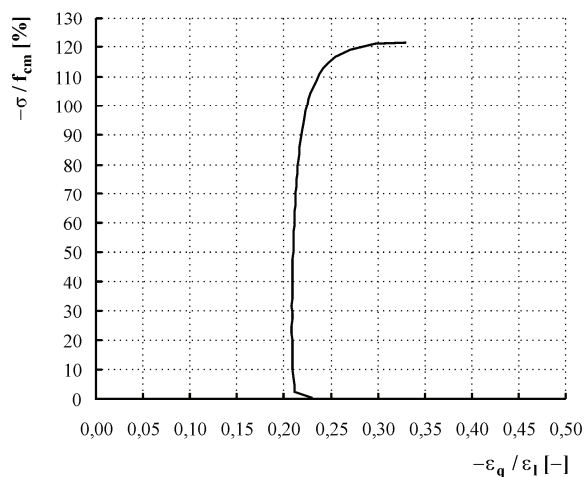
a) Belastungsregime, ergänzende Bemerkungen



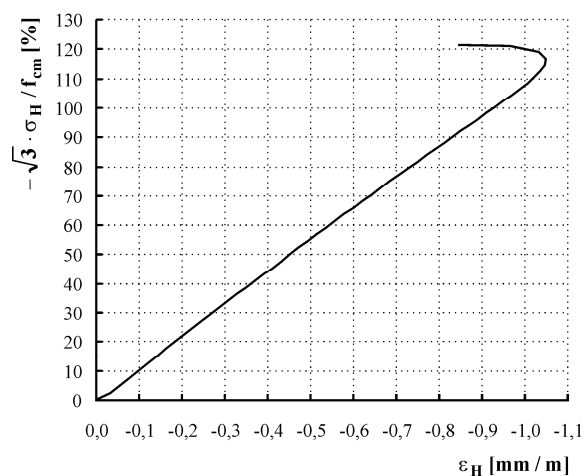
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



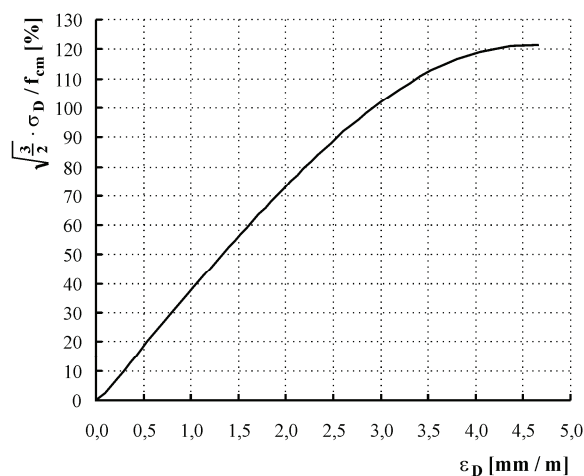
c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



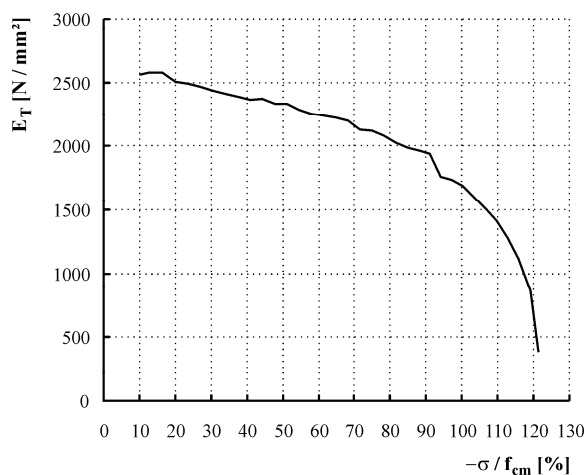
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



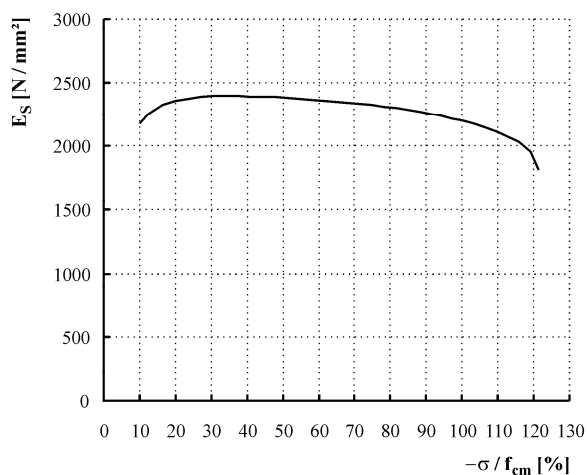
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel A4: Probekörper H 157 (Porenbeton P4.4)

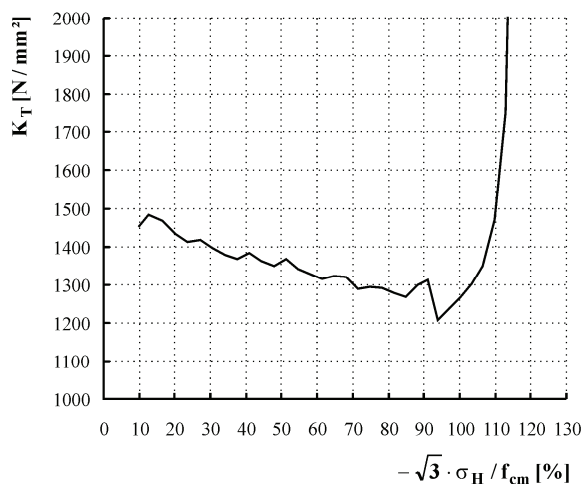
- Fortsetzung -



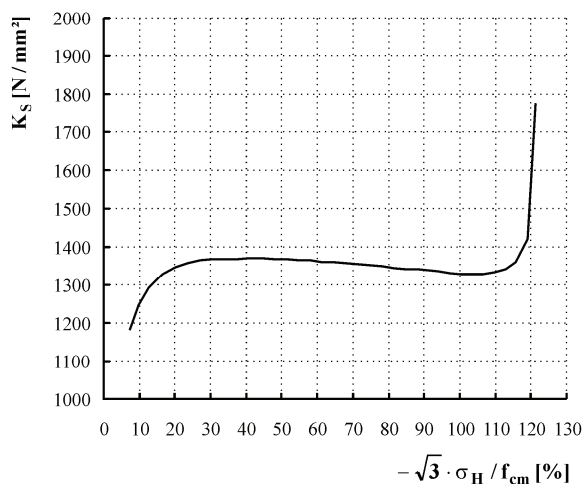
g) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



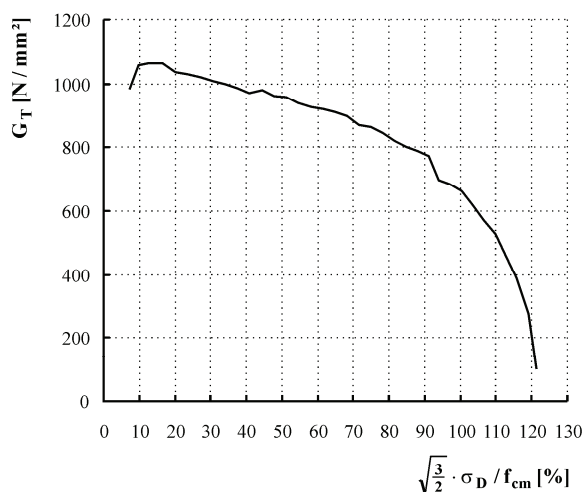
h) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)



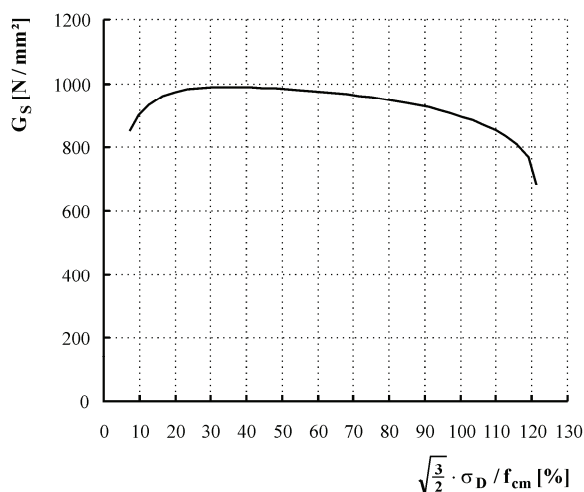
i) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



j) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

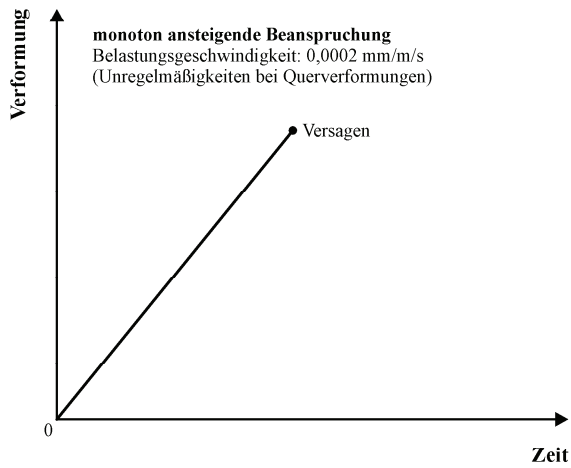


k) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)

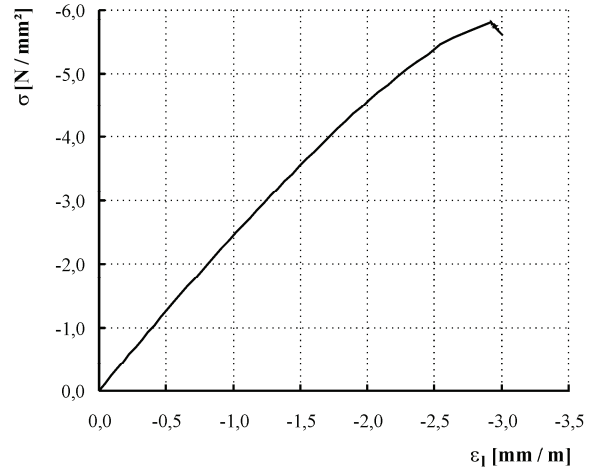


l) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

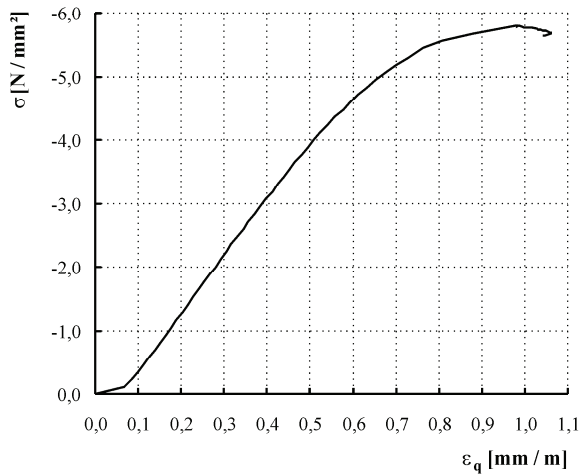
Tafel A5: Probekörper H 150 (Porenbeton P4.4)



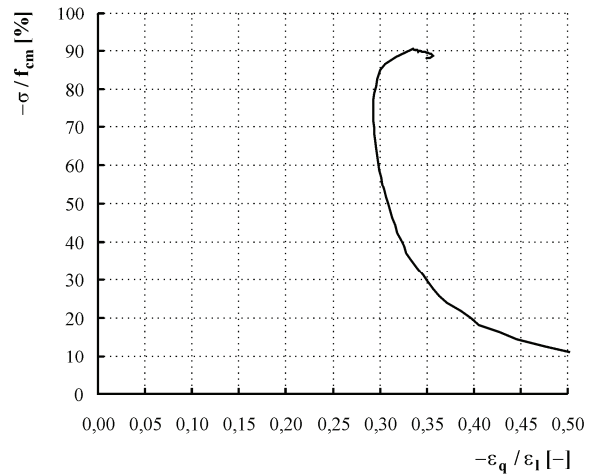
a) Belastungsregime, ergänzende Bemerkungen



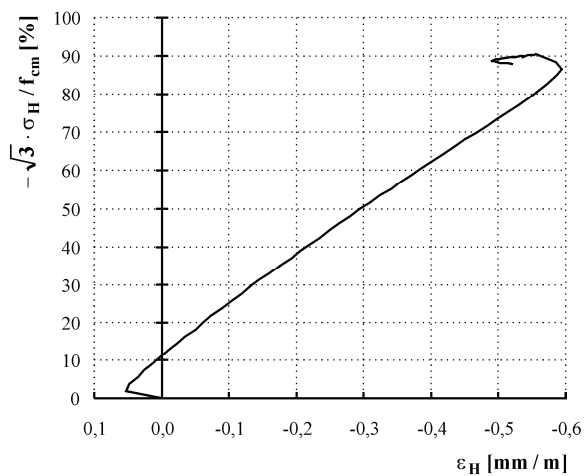
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



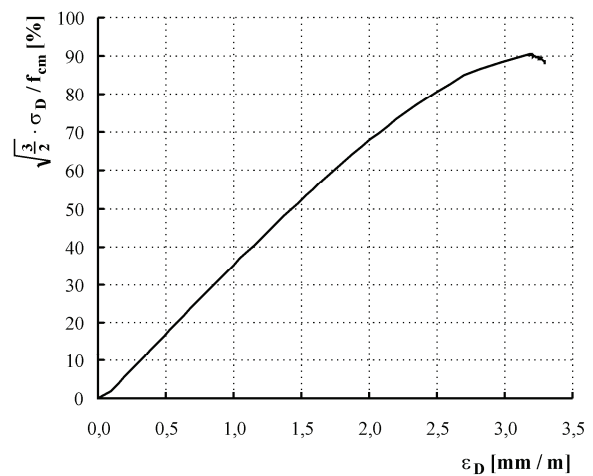
c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



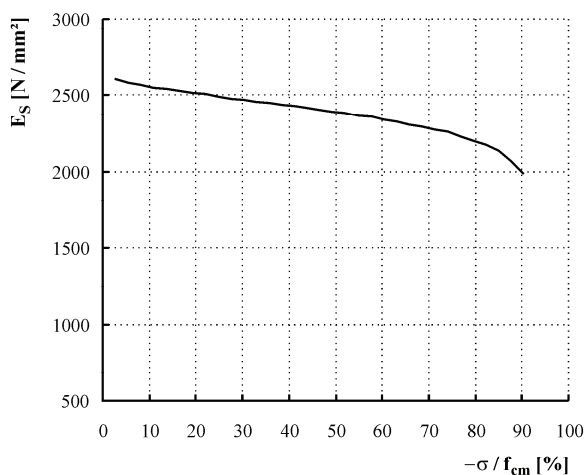
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel A5: Probekörper H 150 (Porenbeton P4.4)

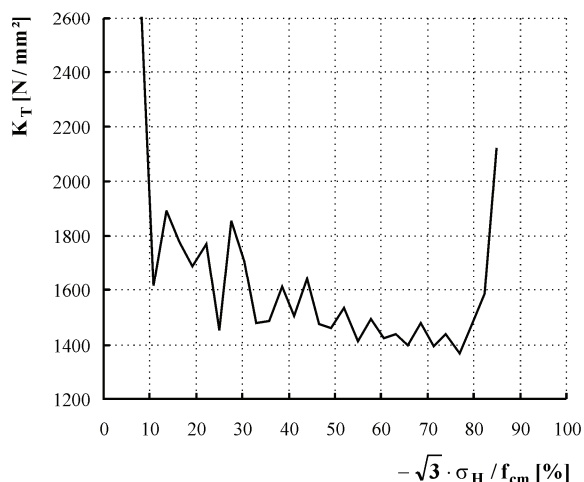
- Fortsetzung -



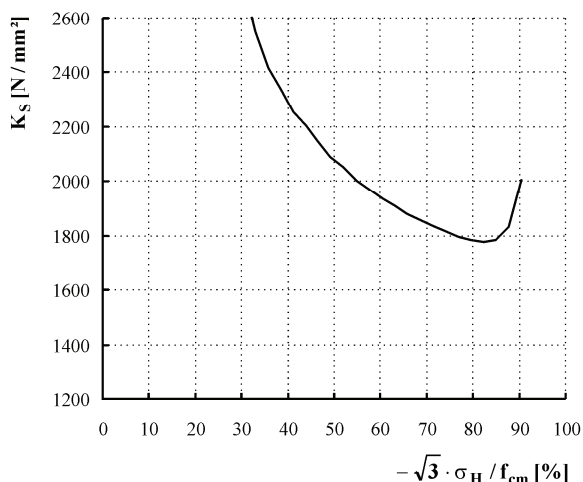
g) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



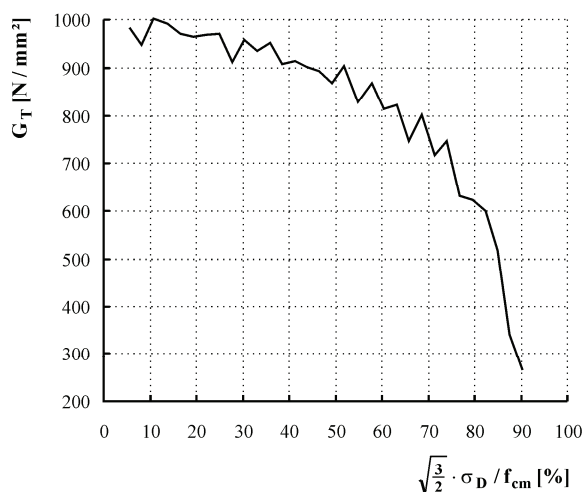
h) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)



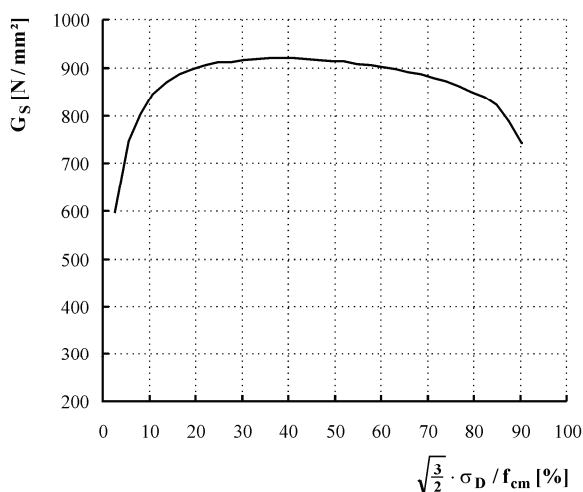
i) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



j) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

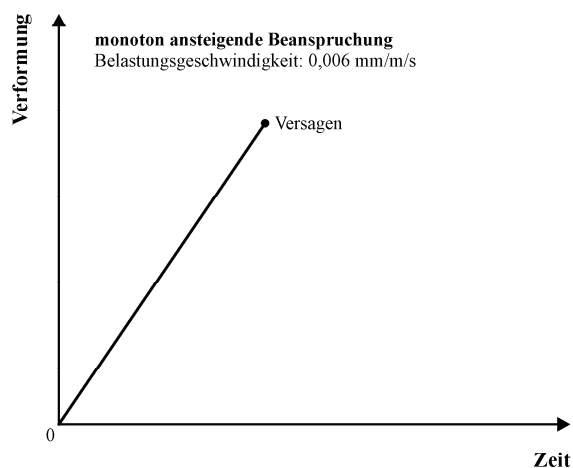


k) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)

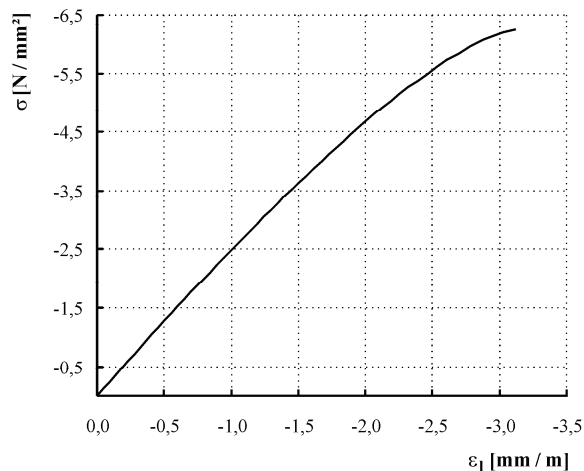


l) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

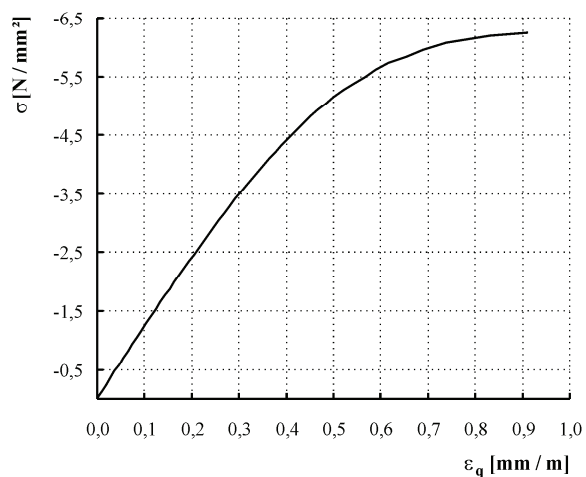
Tafel A6: Probekörper H 152 (Porenbeton P4.4)



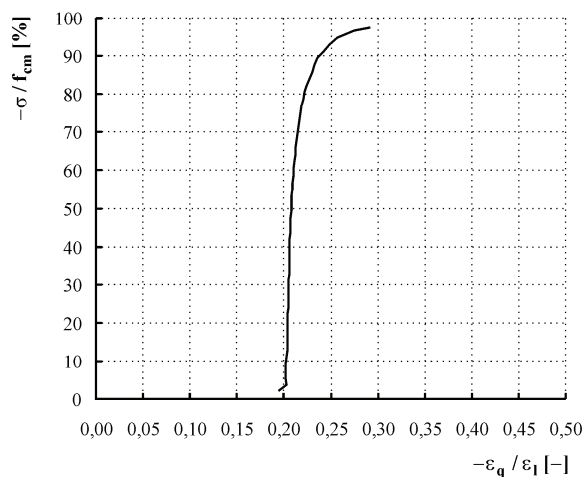
a) Belastungsregime, ergänzende Bemerkungen



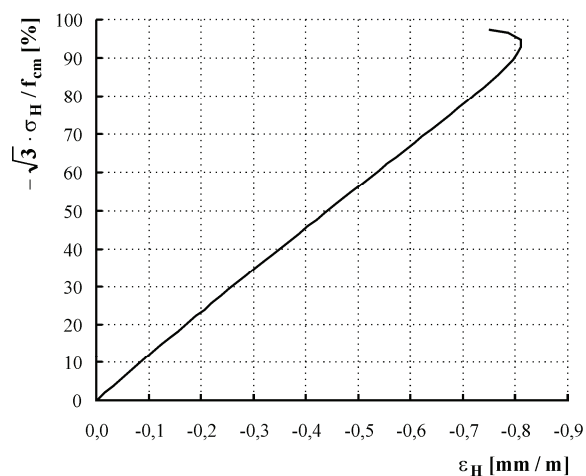
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



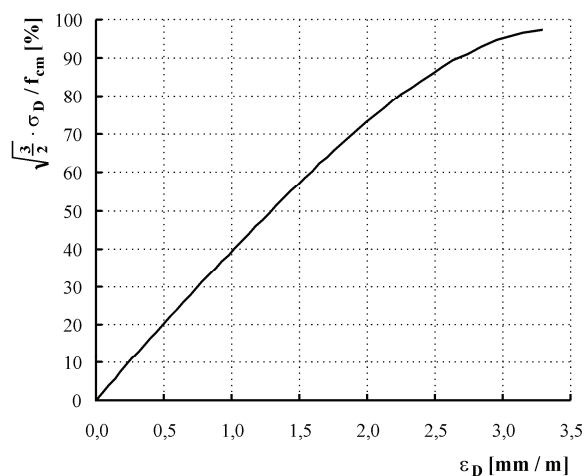
c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



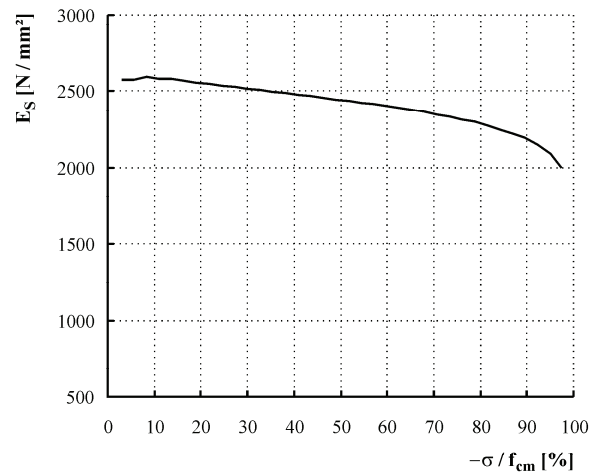
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel A6: Probekörper H 152 (Porenbeton P4.4)

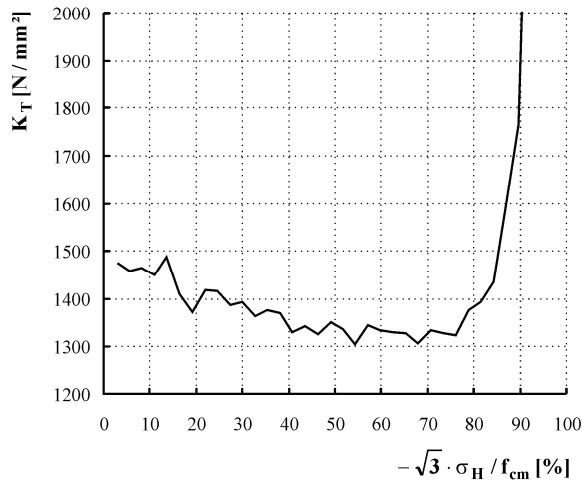
- Fortsetzung -



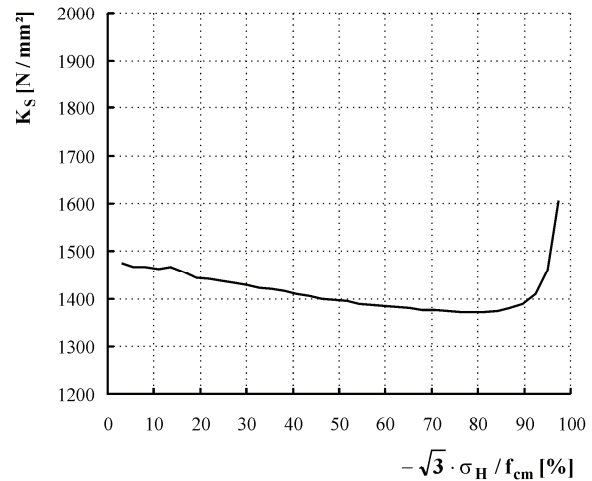
g) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



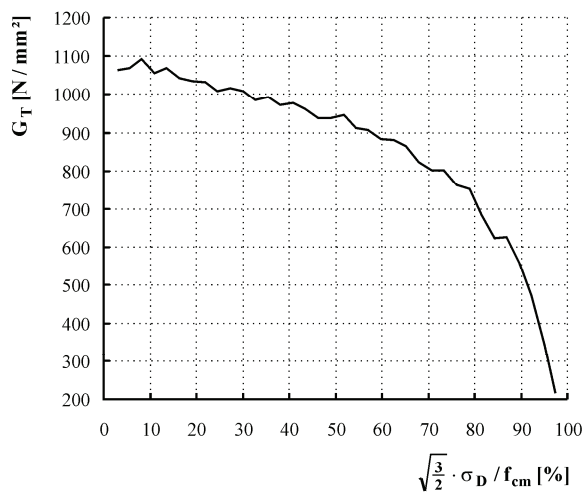
h) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)



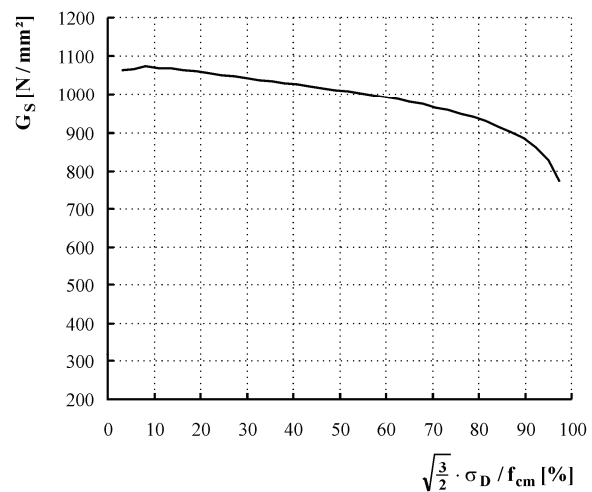
i) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



j) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

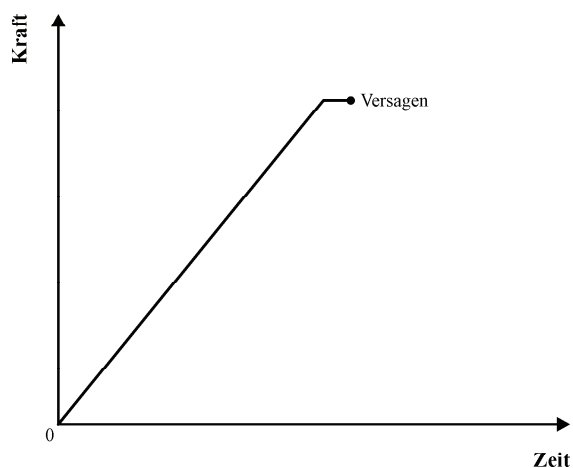


k) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



l) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

Tafel A7: Probekörper H 95-01 (Porenbeton P4.4)

**überwiegend ruhende Belastung**

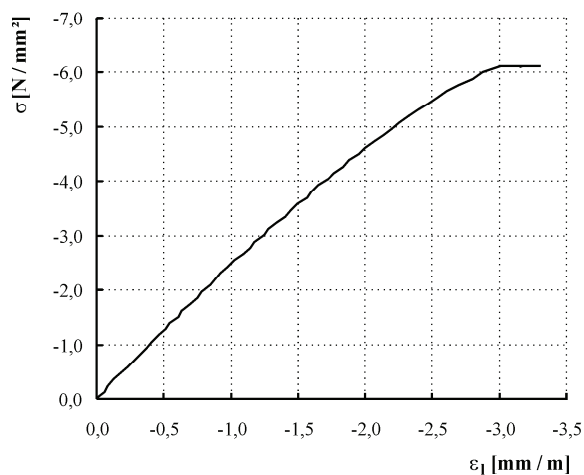
Material: Porenbeton P4.4

Belastungsgeschwindigkeit: 0,015 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,954 f_{cm}

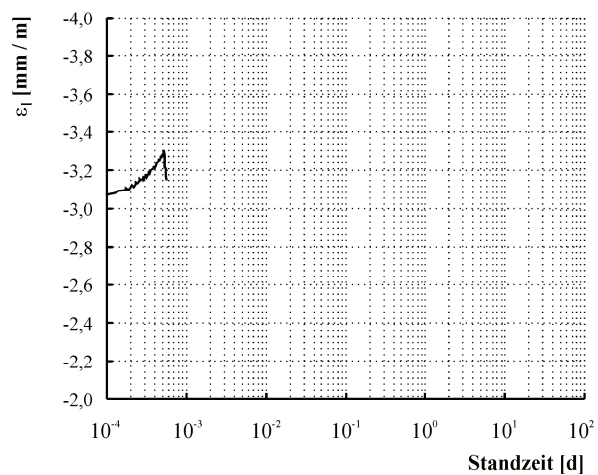
ertragene Standzeit: 50 s

Unregelmäßigkeiten bei Verformungsmessung

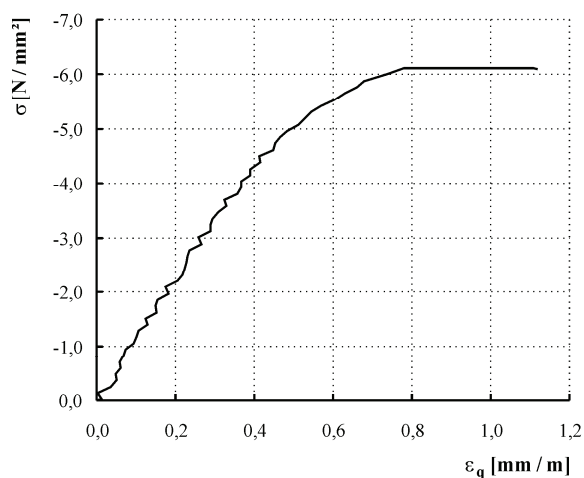
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



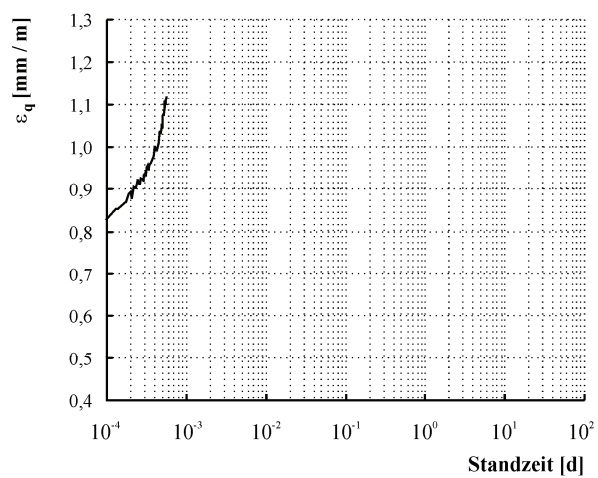
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



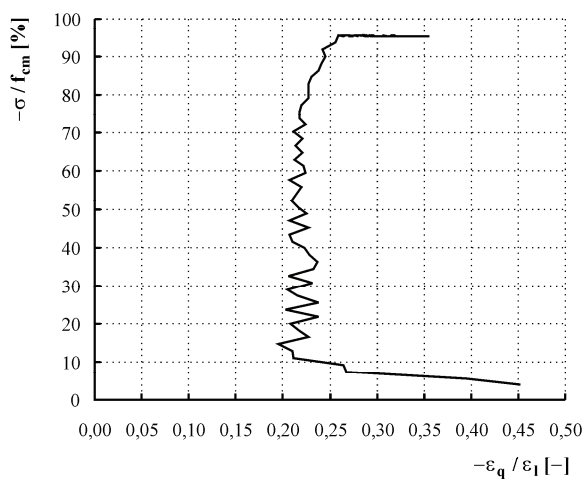
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



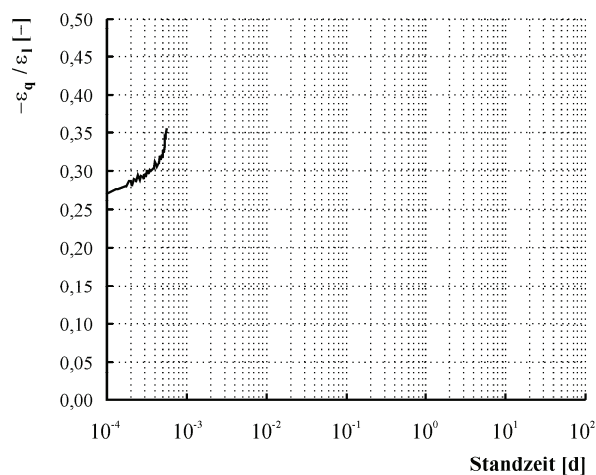
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel A7: Probekörper H 95-01 (Porenbeton P4.4)

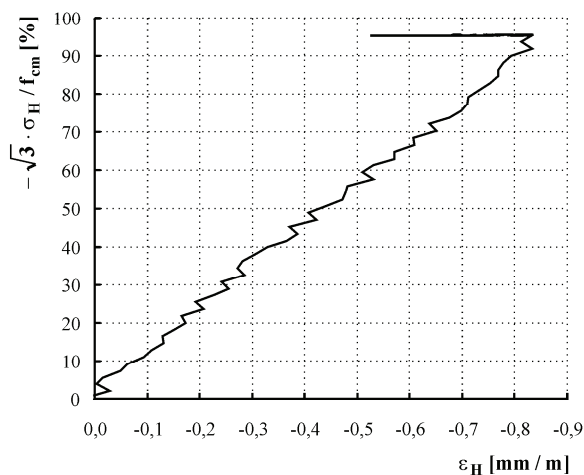
- Fortsetzung -



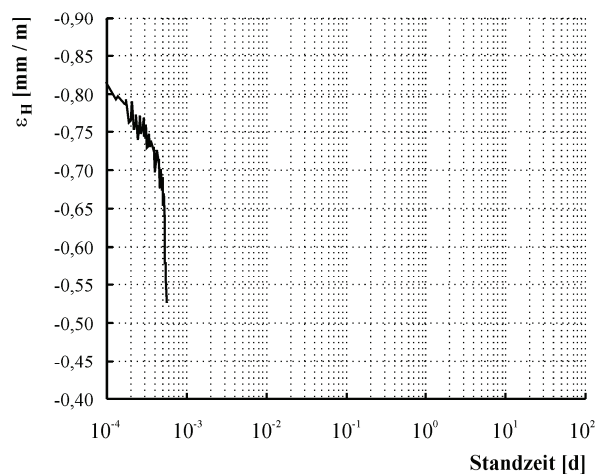
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



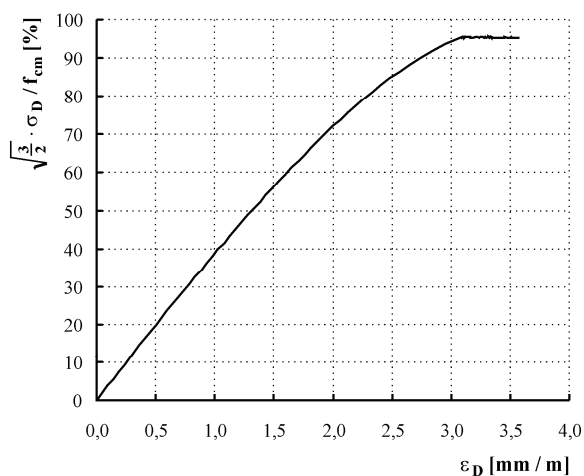
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



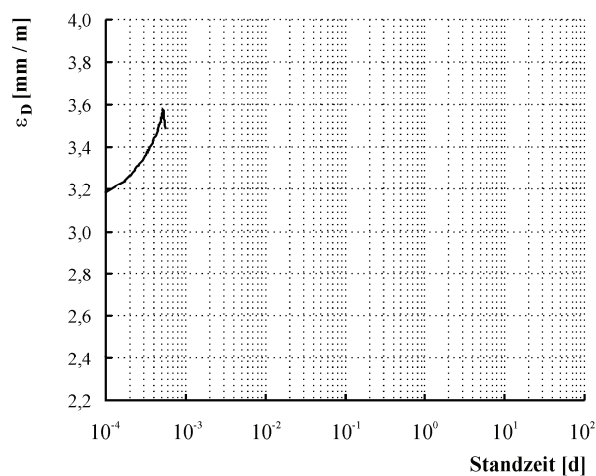
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

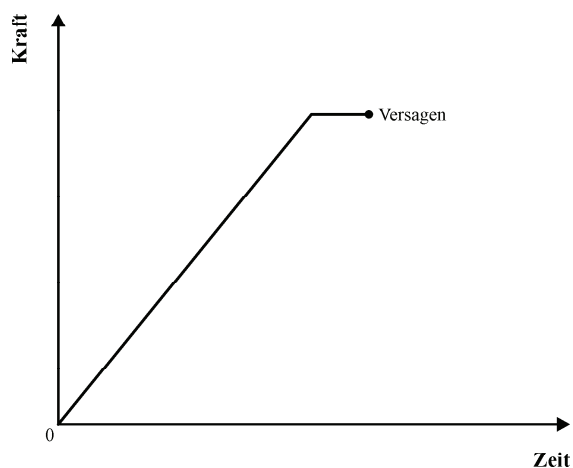


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel A8: Probekörper H 90-01 (Porenbeton P4.4)

**überwiegend ruhende Belastung**

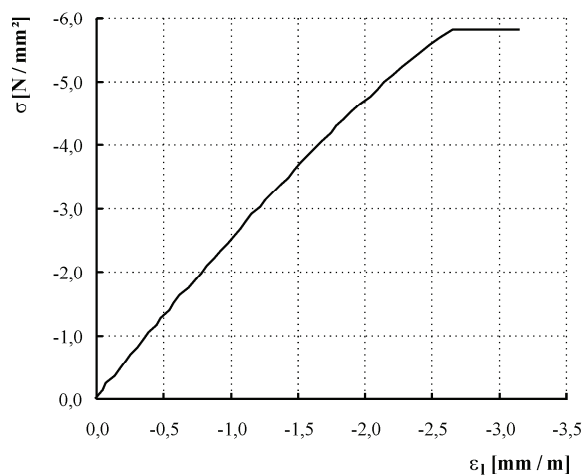
Material: Porenbeton P4.4

Belastungsgeschwindigkeit: 0,015 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,907 f_{cm}

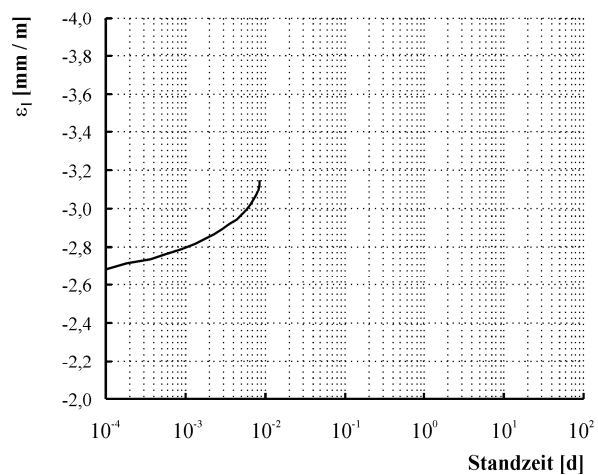
ertragene Standzeit: 741 s

Unregelmäßigkeiten bei Verformungsmessung

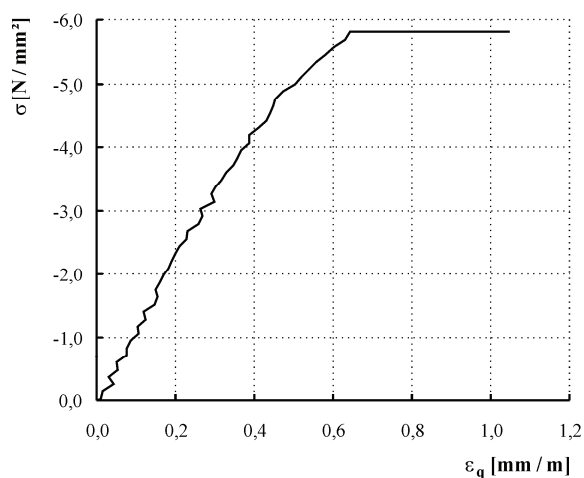
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



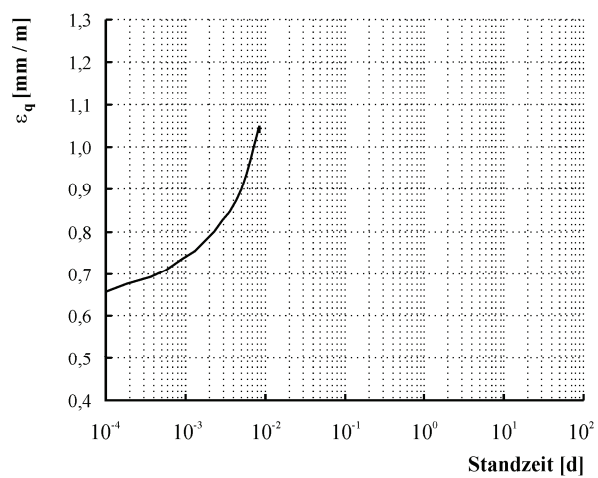
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



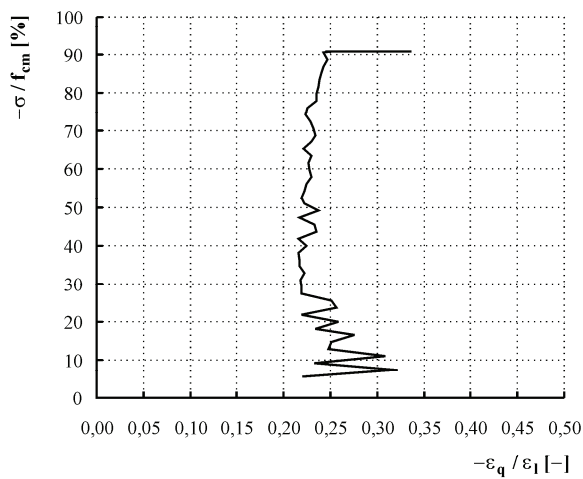
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



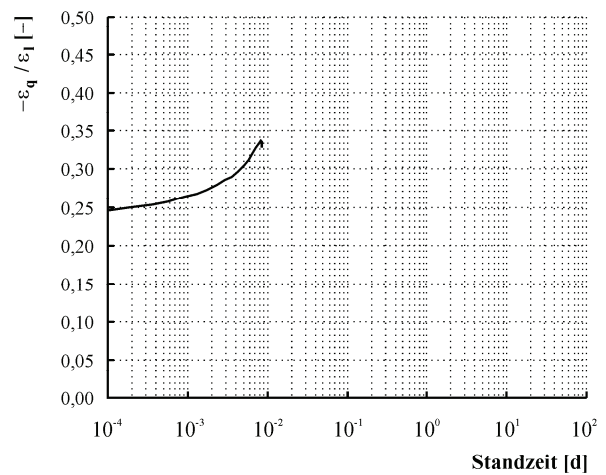
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel A8: Probekörper H 90-01 (Porenbeton P4.4)

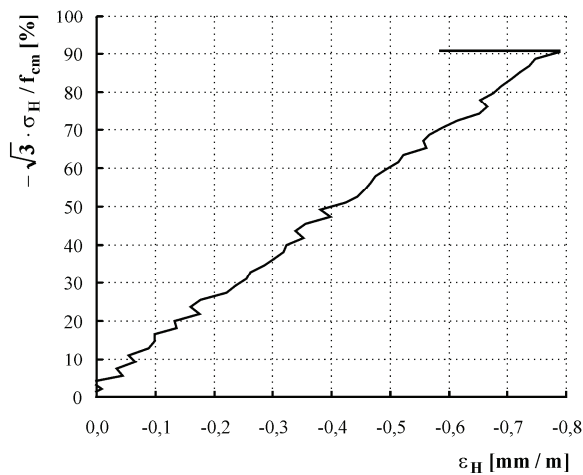
- Fortsetzung -



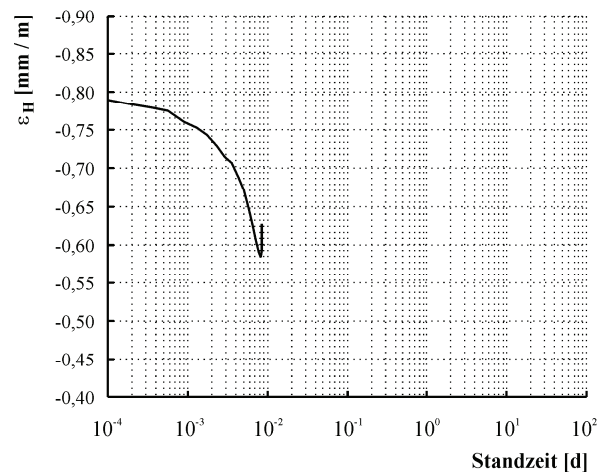
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



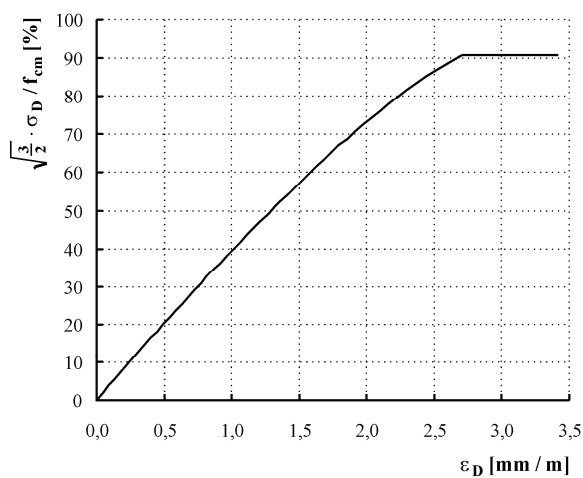
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



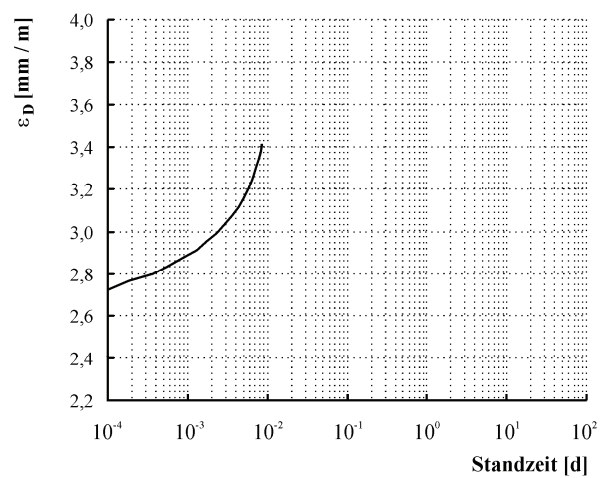
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

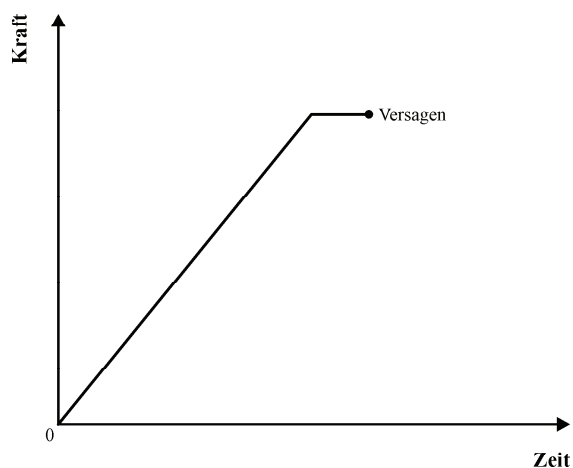


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel A9: Probekörper H 90-02 (Porenbeton P4.4)

**überwiegend ruhende Belastung**

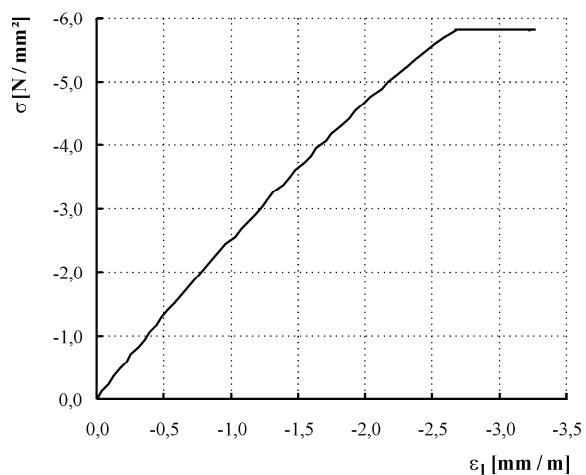
Material: Porenbeton P4.4

Belastungsgeschwindigkeit: 0,015 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,903 f_{cm}

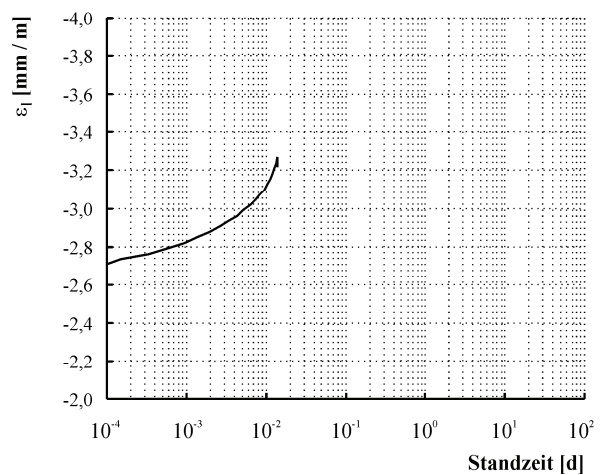
ertragene Standzeit: 1206 s

Unregelmäßigkeiten bei Verformungsmessung

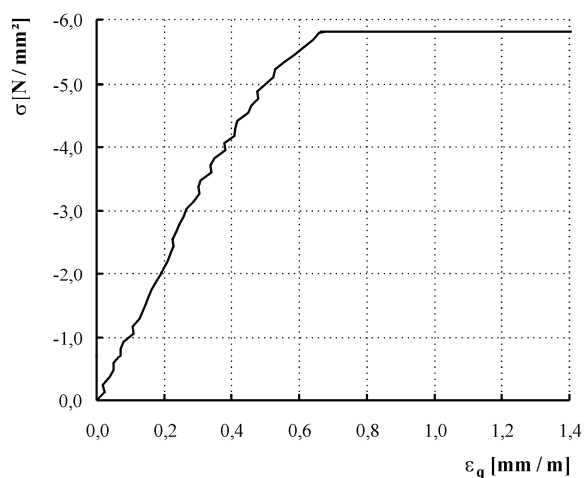
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



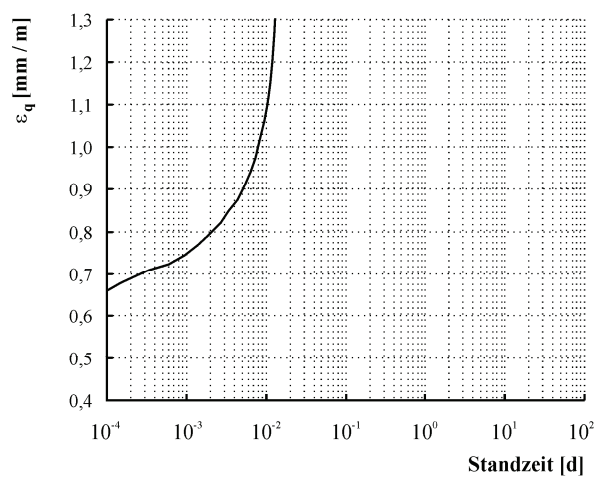
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



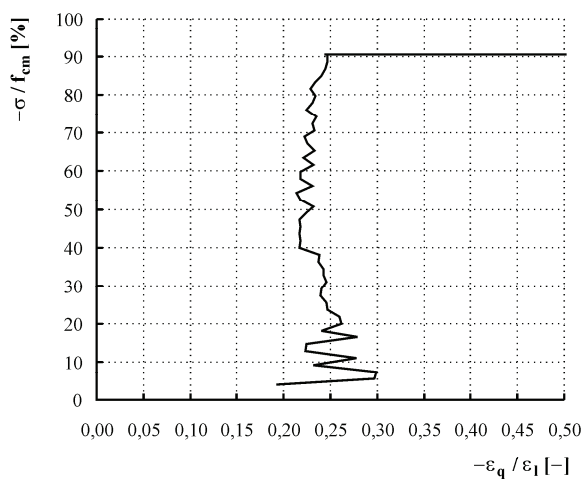
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



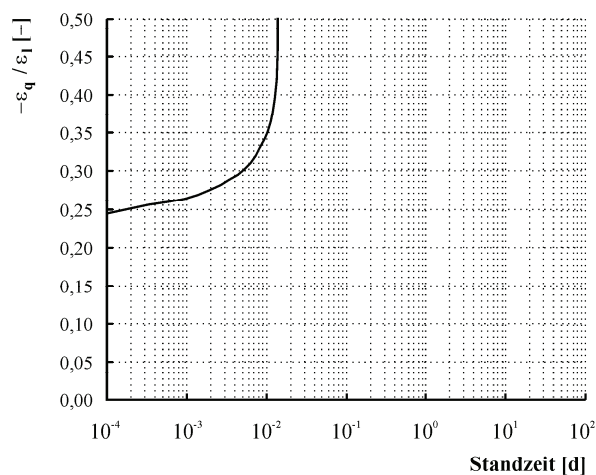
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel A9: Probekörper H 90-02 (Porenbeton P4.4)

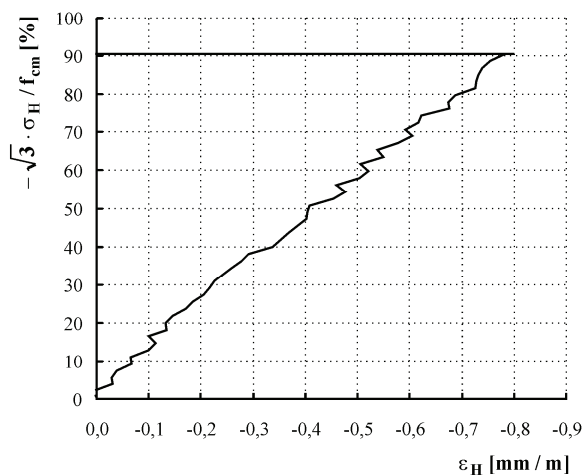
- Fortsetzung -



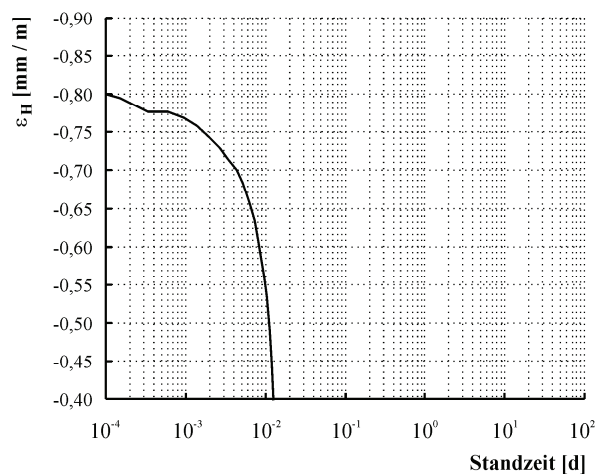
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



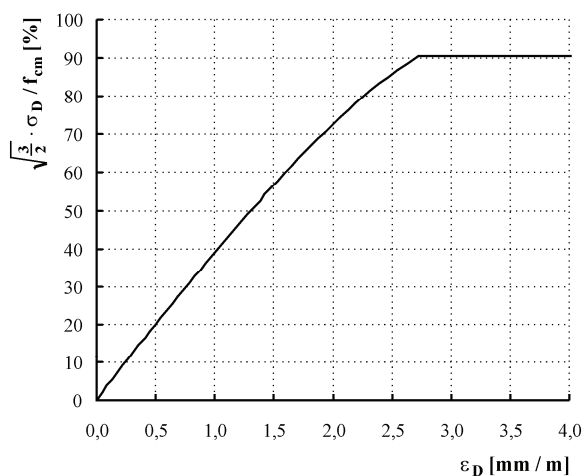
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



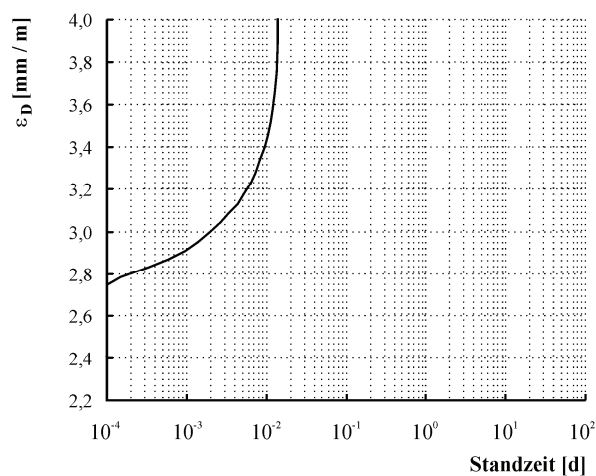
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

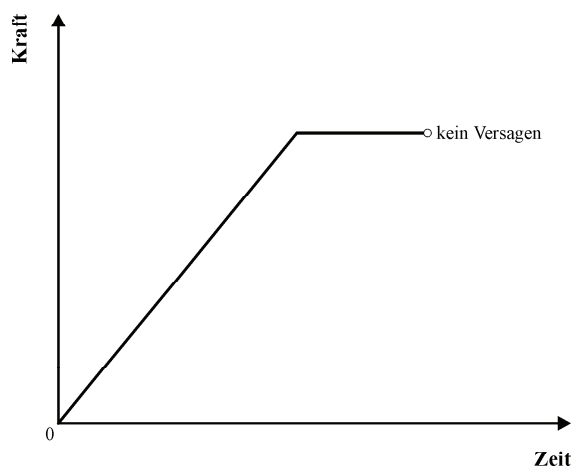


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel A10: Probekörper H 85-01 (Porenbeton P4.4)

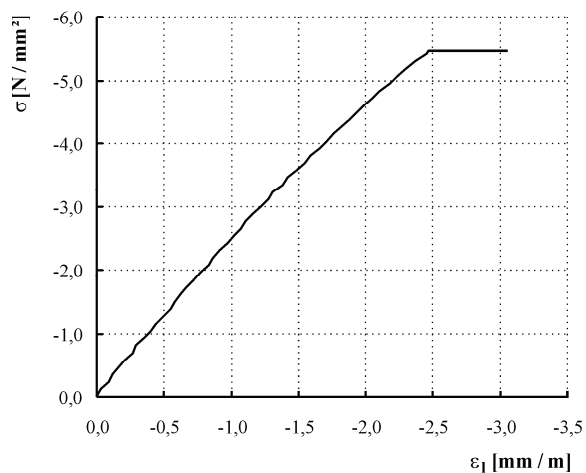
**überwiegend ruhende Belastung**

Material: Porenbeton P4.4

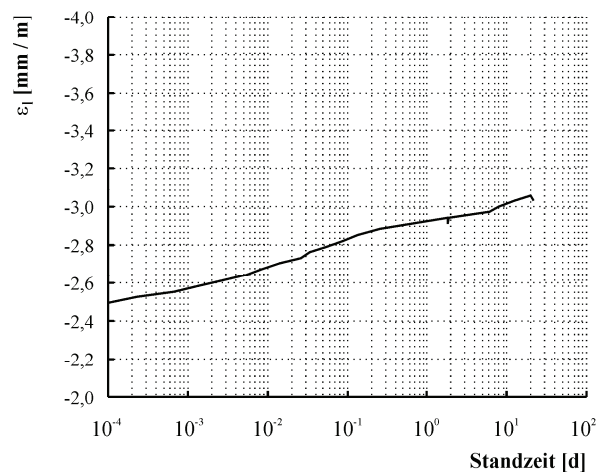
Belastungsgeschwindigkeit: 0,015 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,853 f_{cm}
ertragene Standzeit: 1886954 s

Unregelmäßigkeiten bei Verformungsmessung

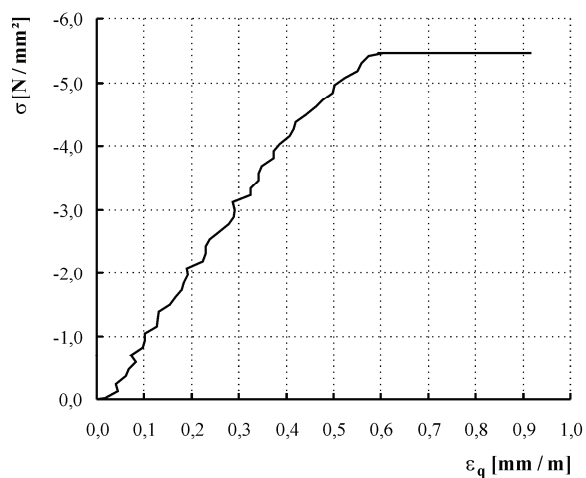
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



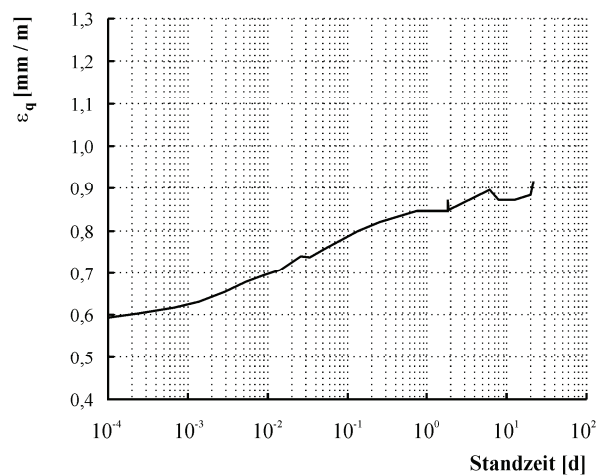
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



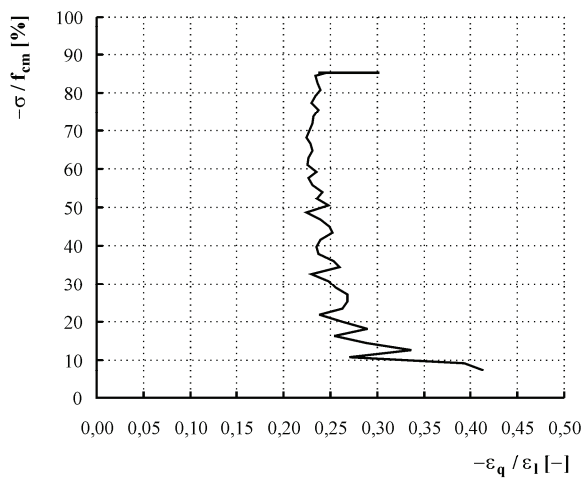
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



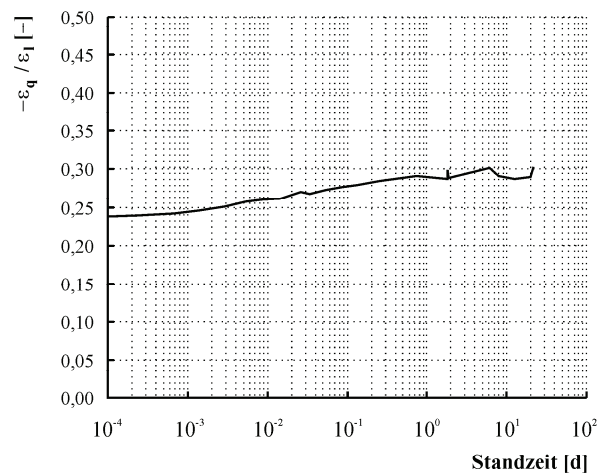
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel A10: Probekörper H 85-01 (Porenbeton P4.4)

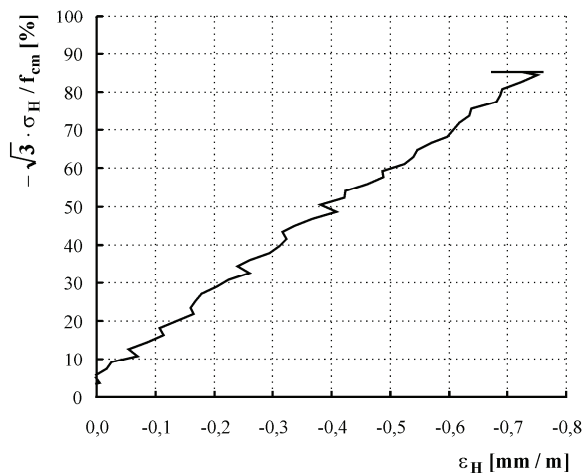
- Fortsetzung -



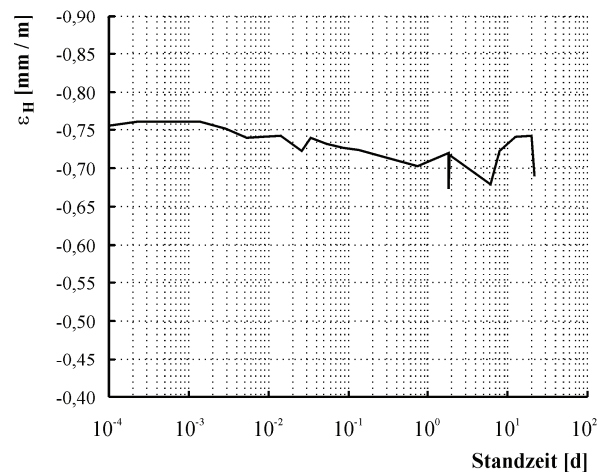
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



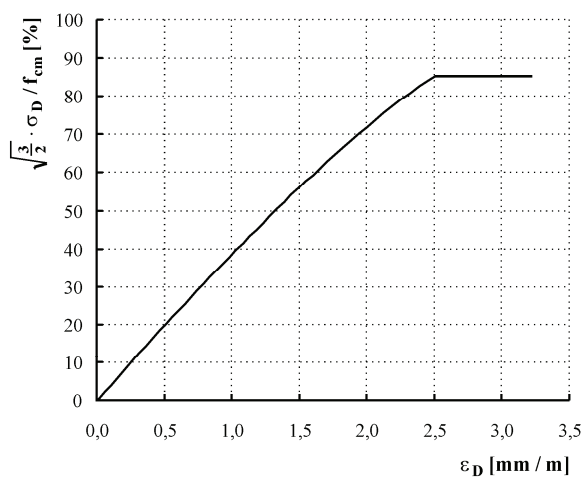
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



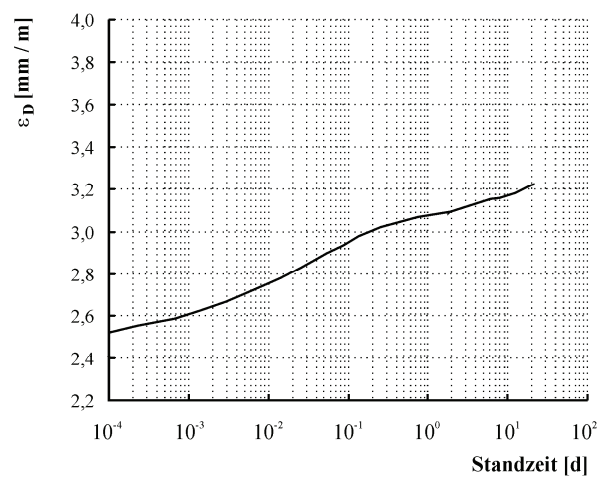
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

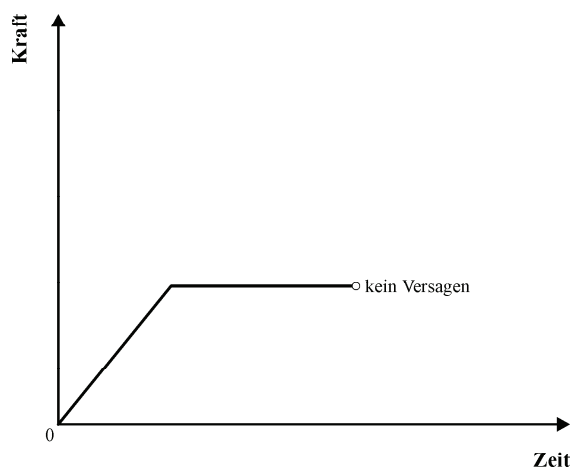


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel A11: Probekörper H V40-03 (Porenbeton P4.4)

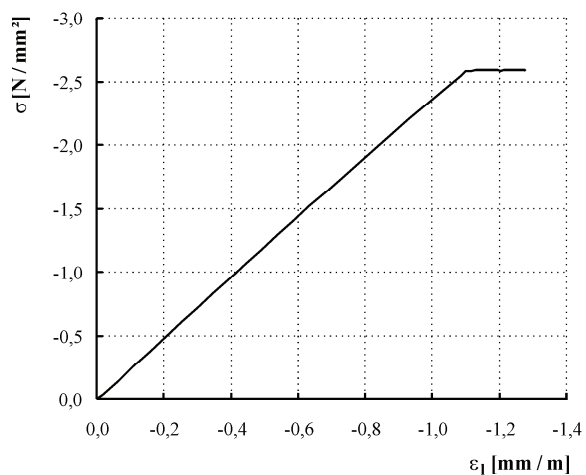
**überwiegend ruhende Belastung**

Material: Porenbeton P4.4

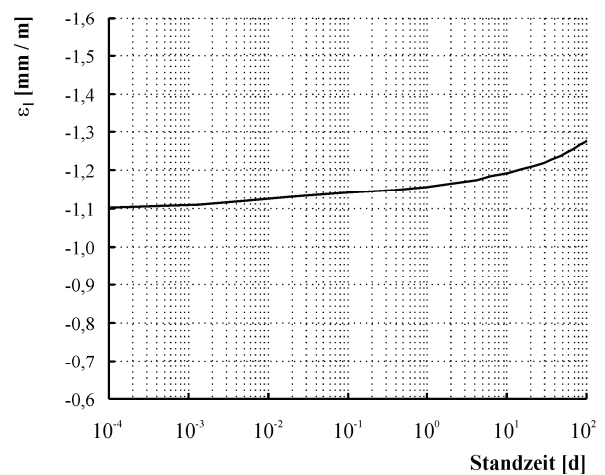
Belastungsgeschwindigkeit: 0,015 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,404 f_{cm}
ertragene Standzeit: 9019994 s

kein Versagen bei Versuchsende

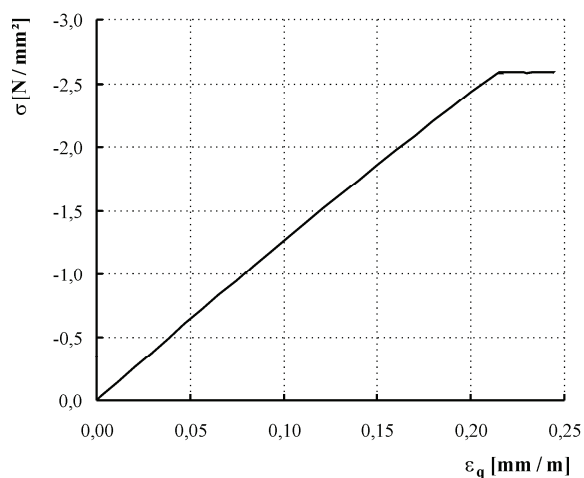
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



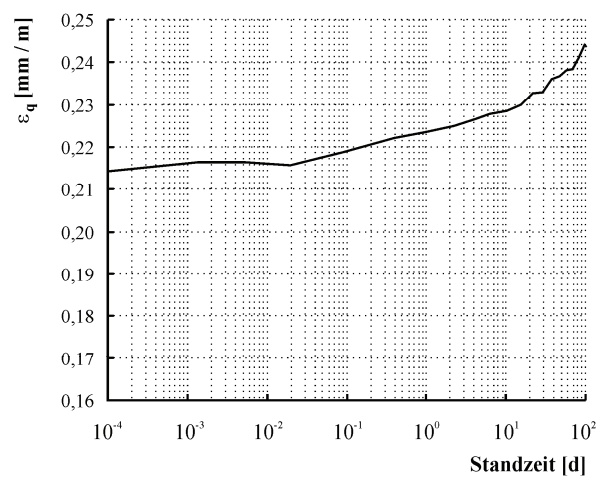
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



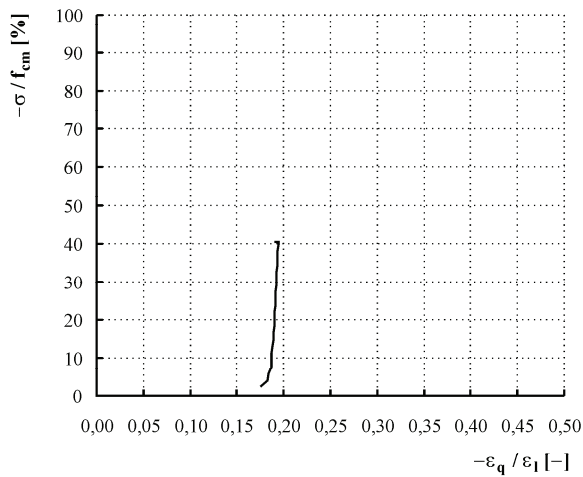
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



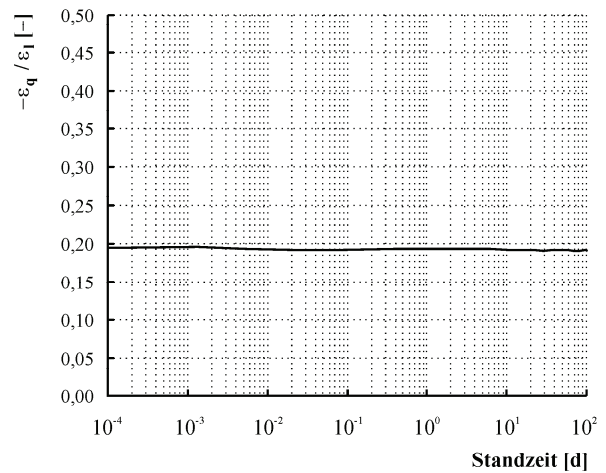
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel A11: Probekörper H V40-03 (Porenbeton P4.4)

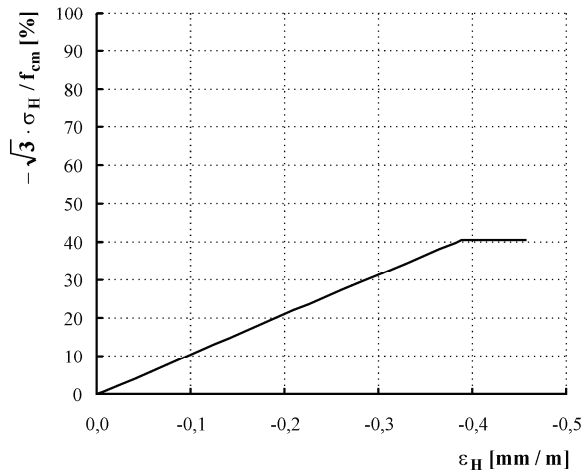
- Fortsetzung -



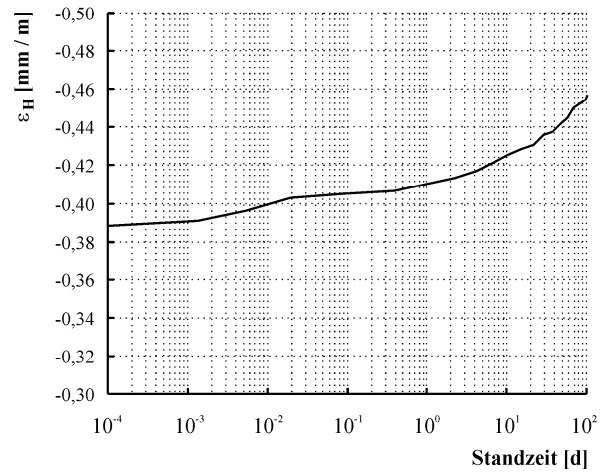
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



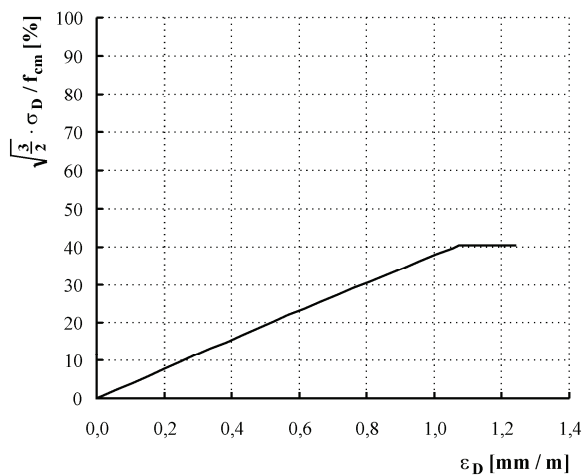
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



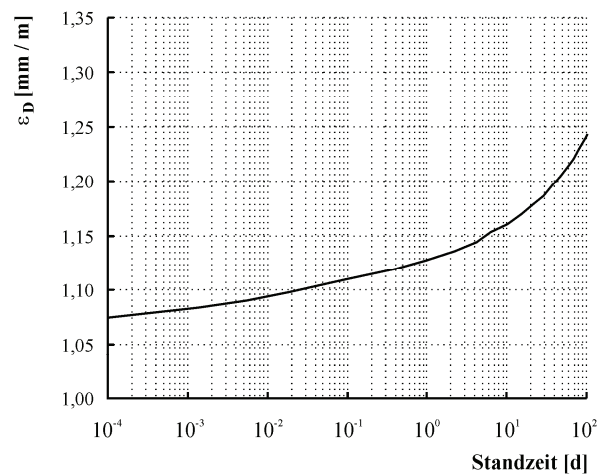
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

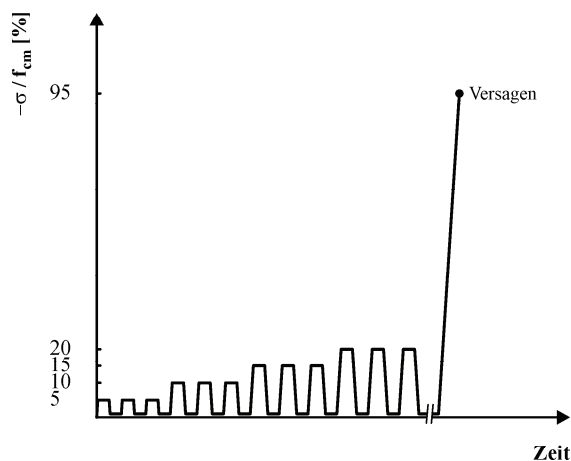


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel A12: Probekörper H RS-01 (Porenbeton P4.4)



schrittweise gesteigerte Belastung

Material: Porenbeton P4.4

Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: 0,015 N/mm²/s

Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 180 s

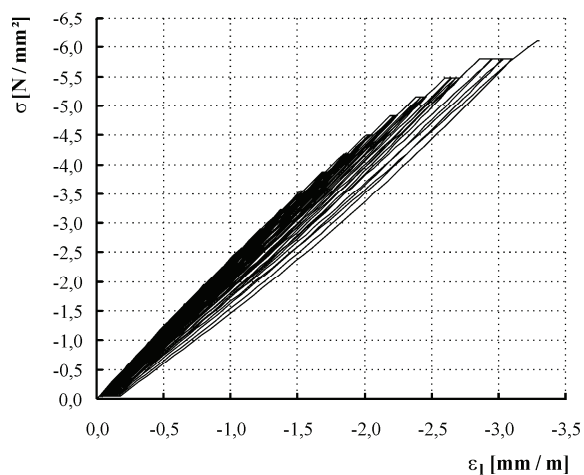
Grundlast: 1 kN

Laststufendifferenz: 0,05 f_{cm}

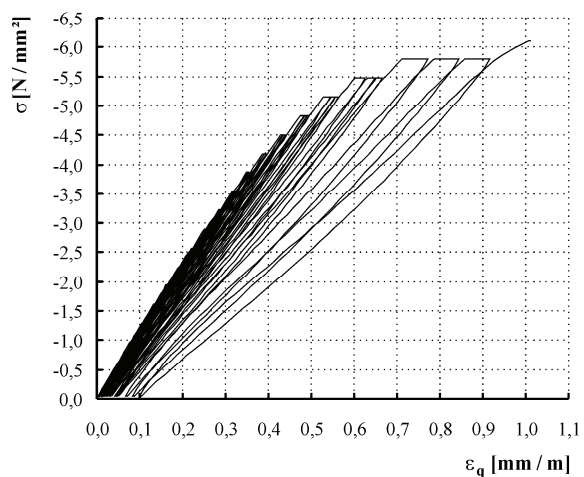
Zyklen je Laststufe: 3

Versagen bei Versuchsende

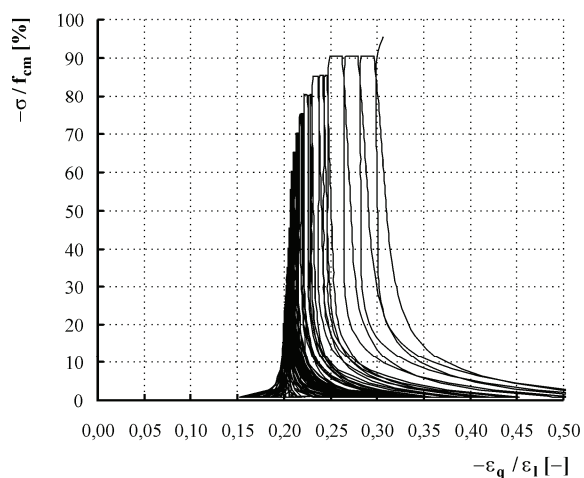
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



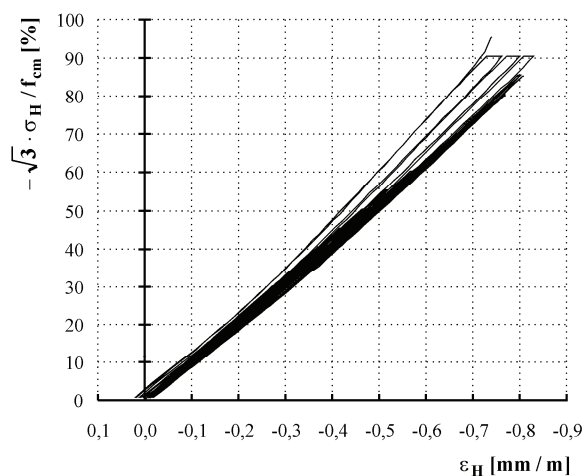
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



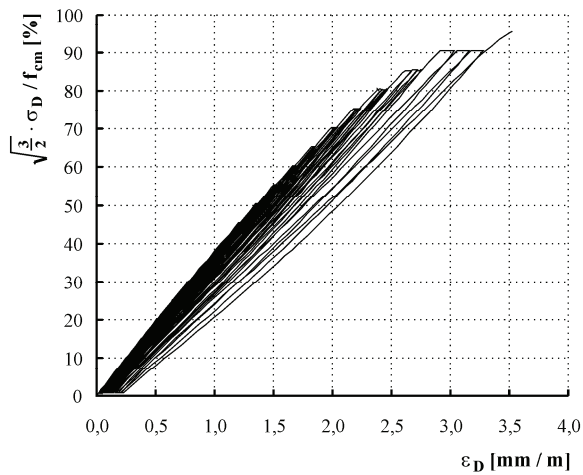
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



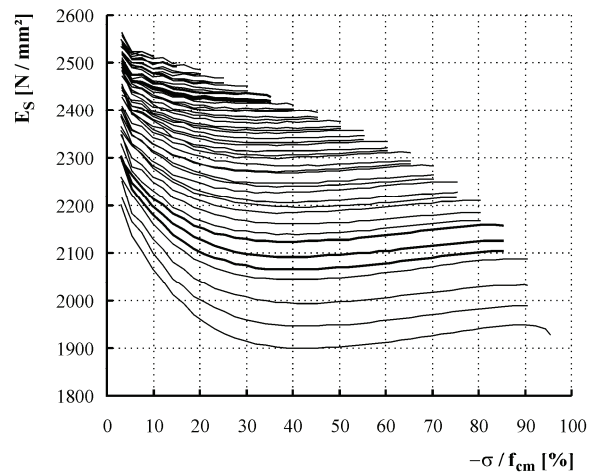
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel A12: Probekörper H RS-01 (Porenbeton P4.4)

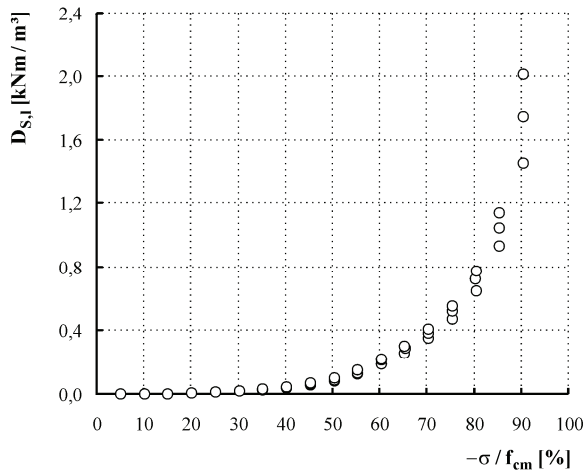
- Fortsetzung -



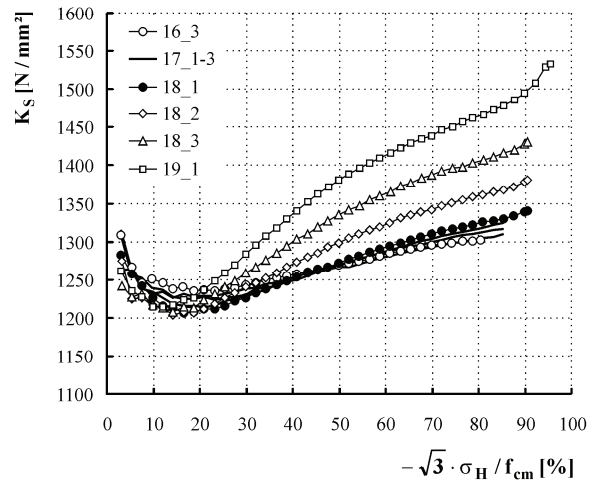
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



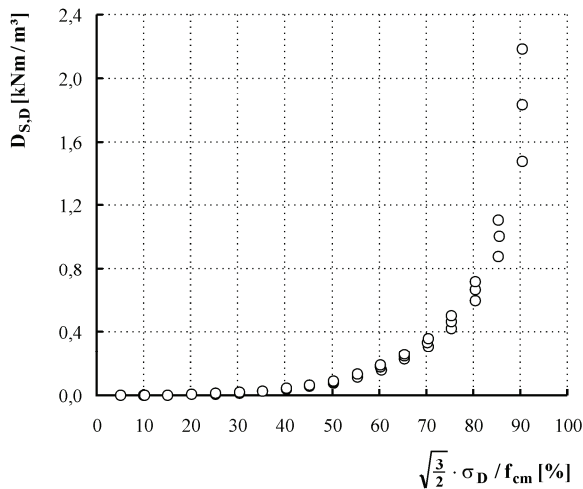
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade



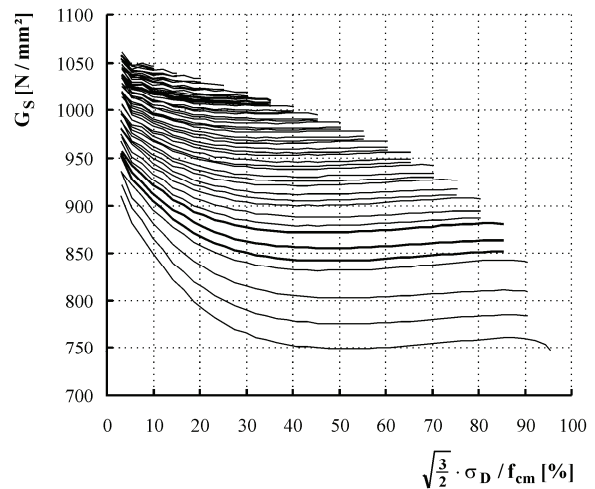
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade ausgewählter Zyklen

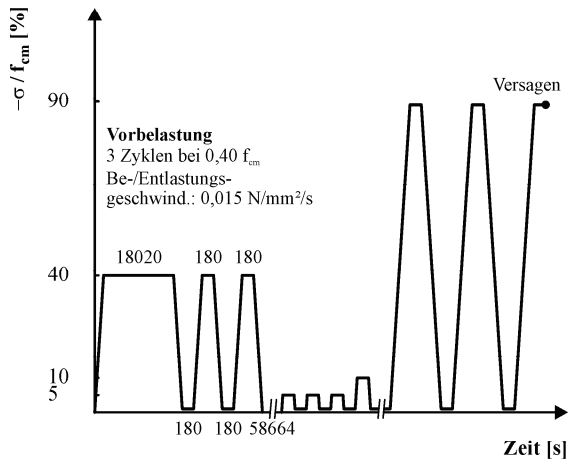


j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade

Tafel A13: Probekörper H V40-01 (Porenbeton P4.4)



schrittweise gesteigerte Belastung nach Vorbelastung
(Angaben zur Vorbelastung siehe links)

Material: Porenbeton P4.4

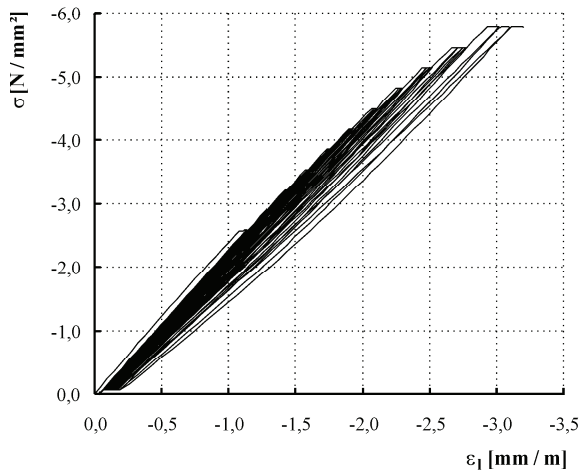
Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: $0,015 \text{ N/mm}^2/\text{s}$

Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 180 s
Grundlast: 1 kN
Laststufendifferenz: $0,05 f_{cm}$
Zyklen je Laststufe: 3

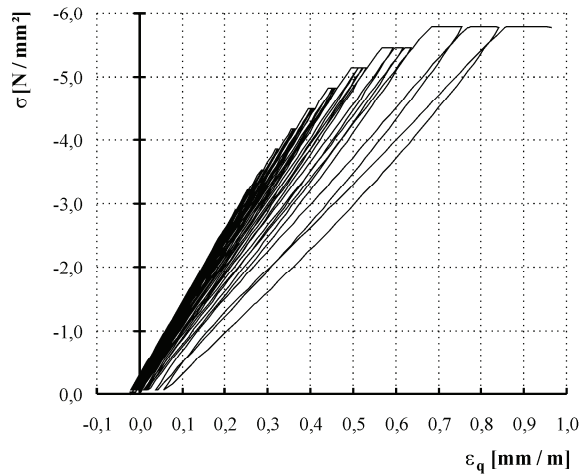
Versagen bei Versuchsende

Unregelmäßigkeiten bei Querverformungen

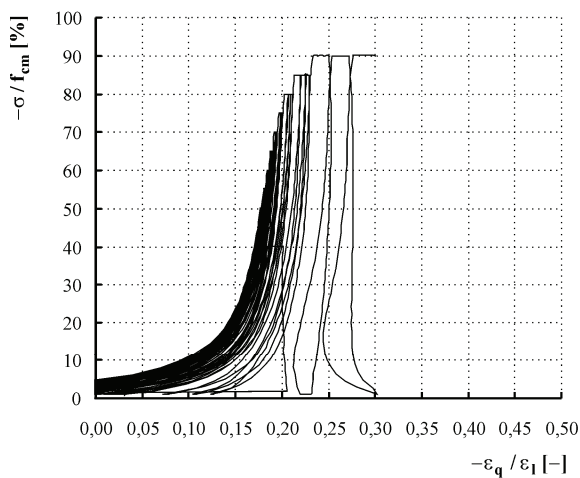
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



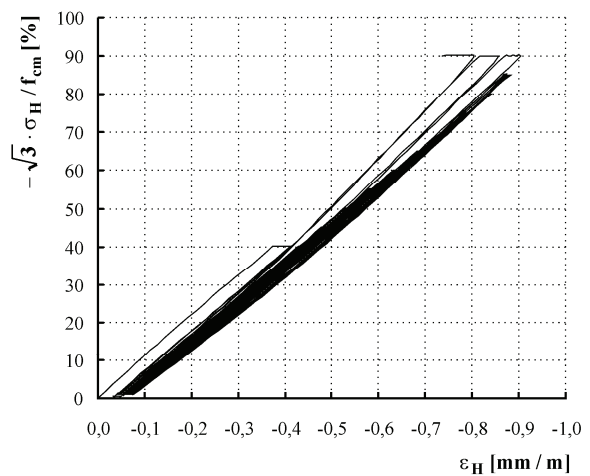
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



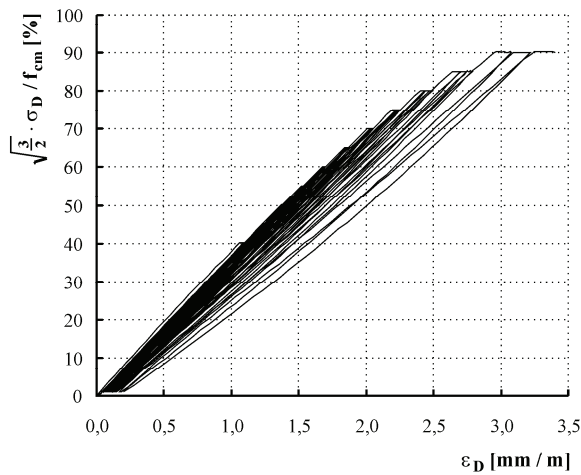
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



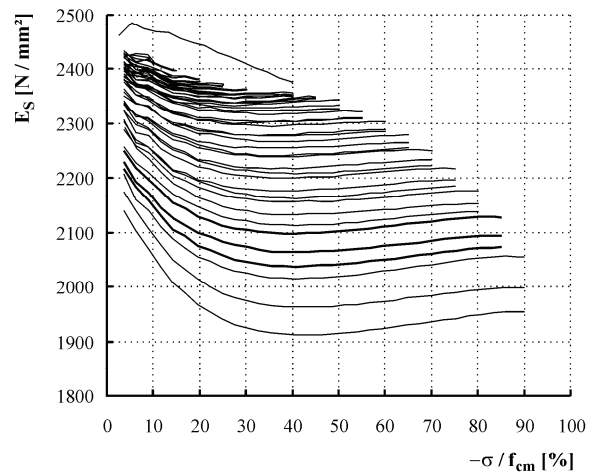
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel A13: Probekörper H V40-01 (Porenbeton P4.4)

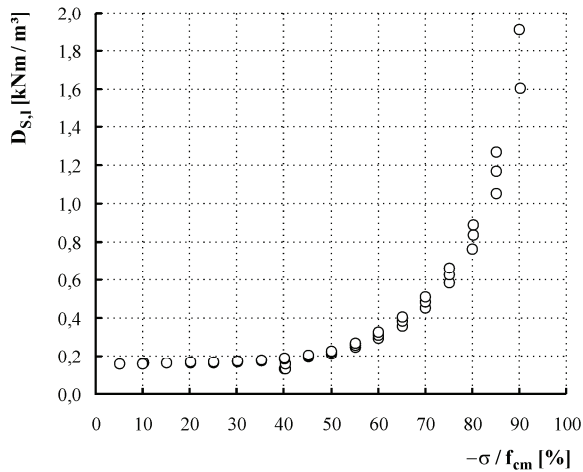
- Fortsetzung -



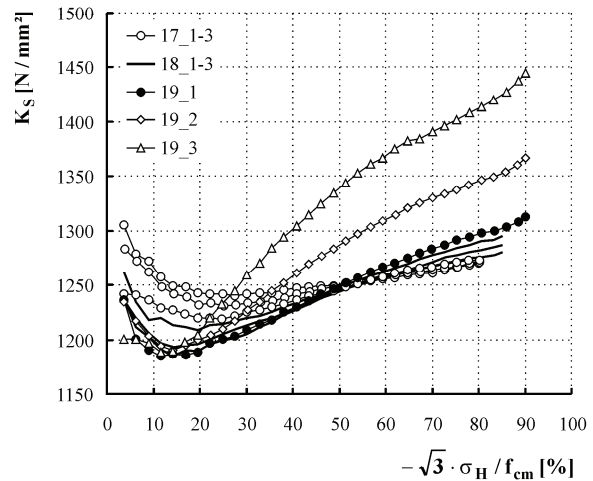
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



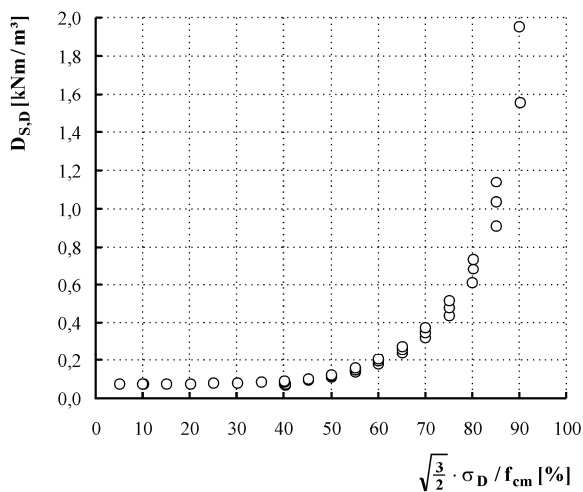
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade



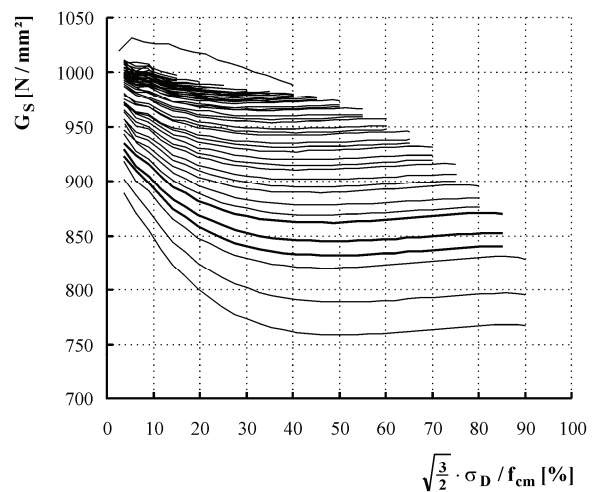
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade ausgewählter Zyklen

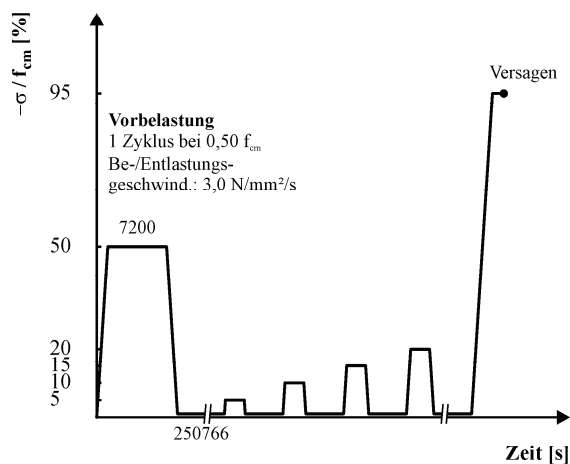


j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade

Tafel A14: Probekörper H 151 (Porenbeton P4.4)



schrittweise gesteigerte Belastung nach Vorbelastung
(Angaben zur Vorbelastung siehe links)

Material: Porenbeton P4.4

Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: $0,015 \text{ N/mm}^2/\text{s}$

Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 1800 s / 3600 s

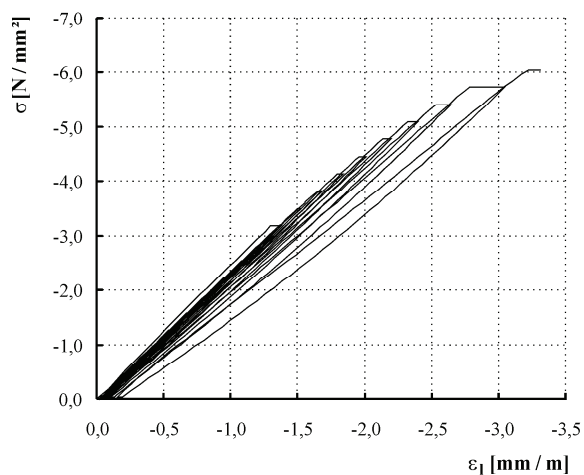
Grundlast: 1 kN

Laststufendifferenz: $0,05 f_{cm}$

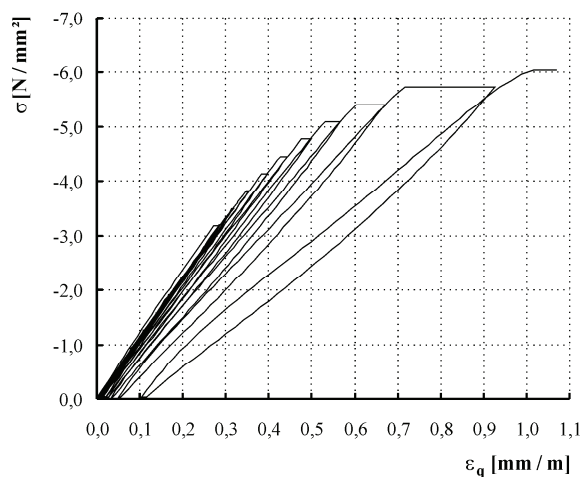
Zyklen je Laststufe: 1

Versagen bei Versuchsende

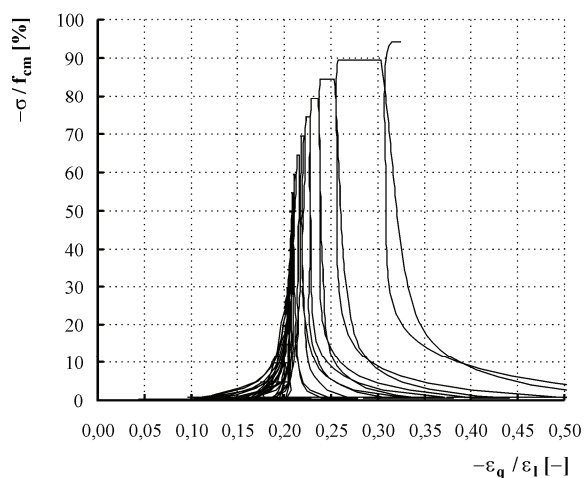
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



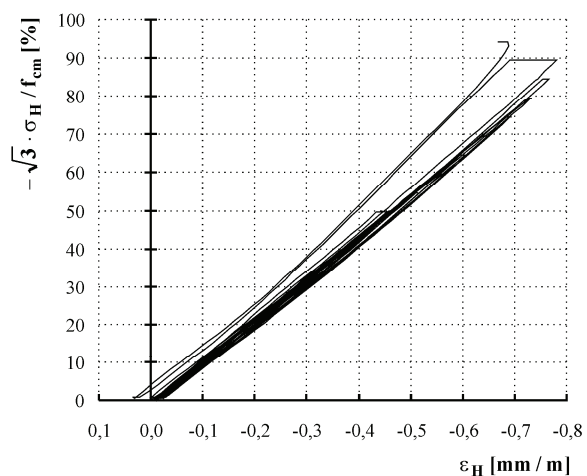
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



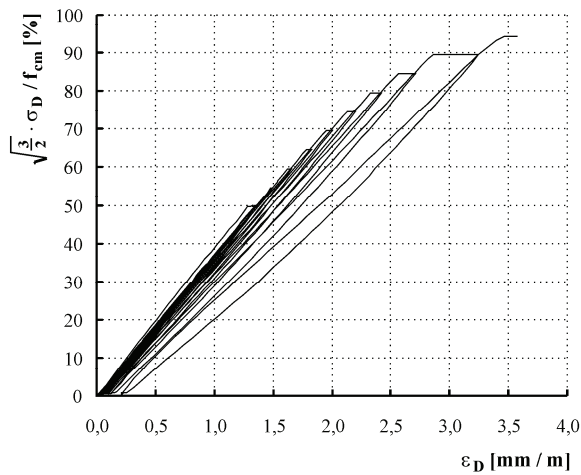
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



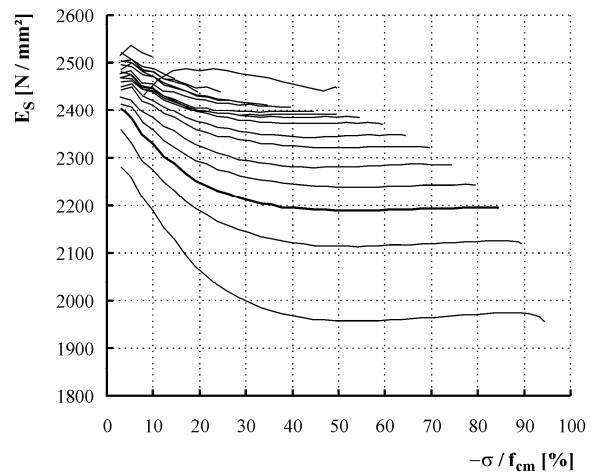
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel A14: Probekörper H 151 (Porenbeton P4.4)

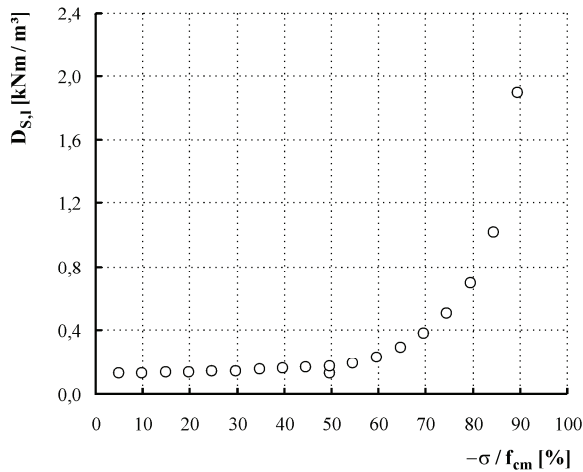
- Fortsetzung -



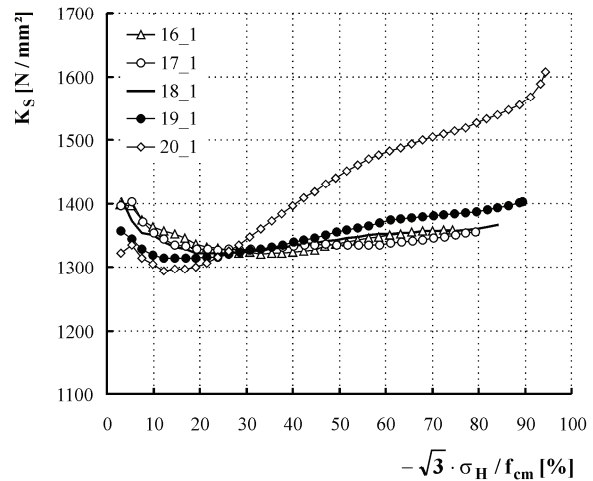
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



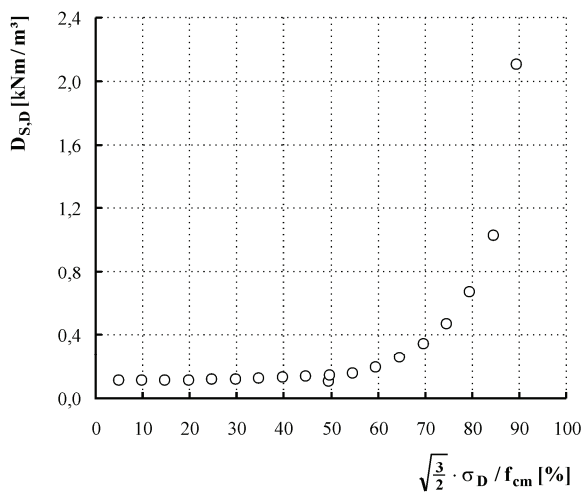
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade



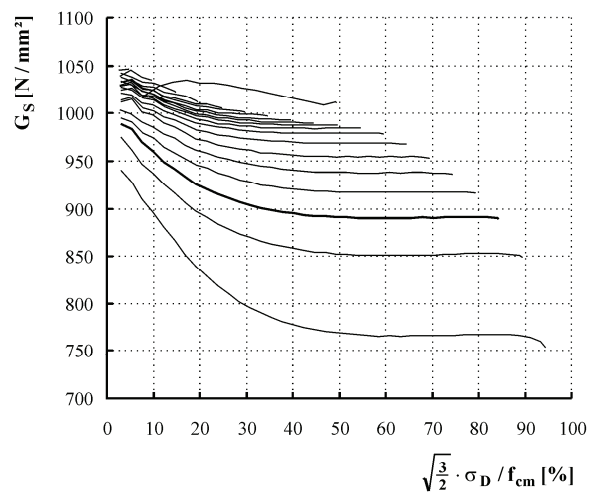
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade ausgewählter Zyklen

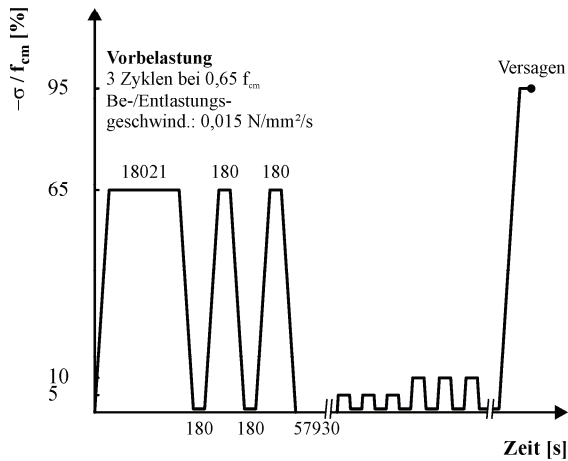


j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade

Tafel A15: Probekörper H V65-01 (Porenbeton P4.4)



schrittweise gesteigerte Belastung nach Vorbelastung
(Angaben zur Vorbelastung siehe links)

Material: Porenbeton P4.4

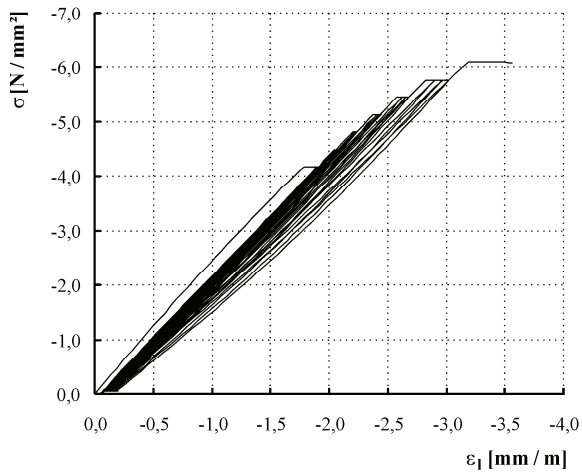
Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: $0,015 \text{ N/mm}^2/\text{s}$

Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 180 s
Grundlast: 1 kN
Laststufendifferenz: $0,05 f_{cm}$
Zyklen je Laststufe: 3

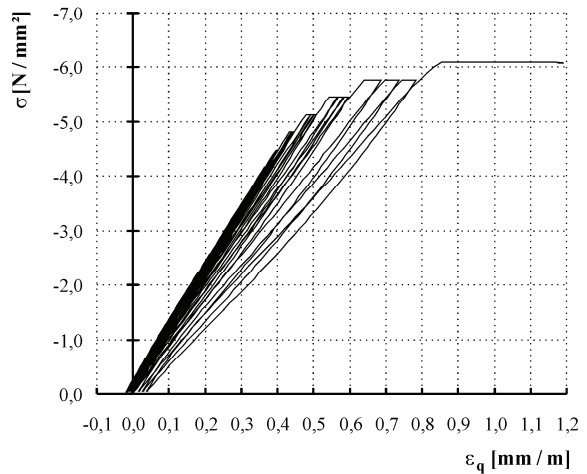
Versagen bei Versuchsende

Unregelmäßigkeiten bei Querverformungen

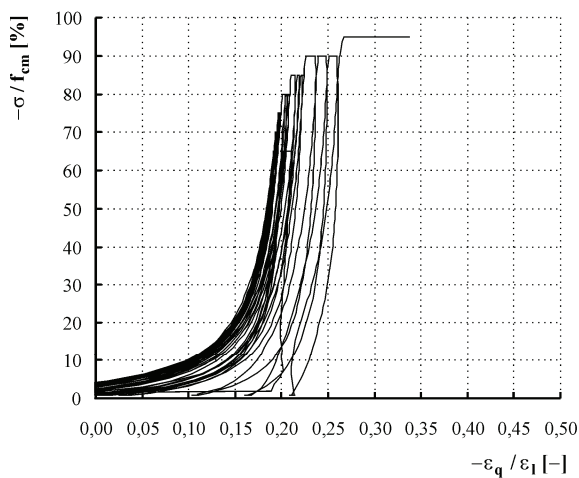
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



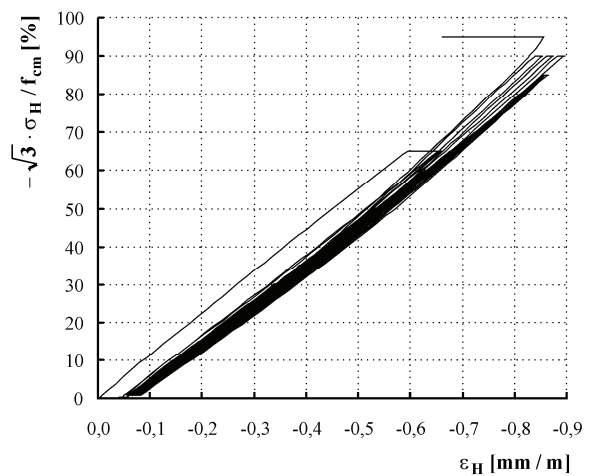
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



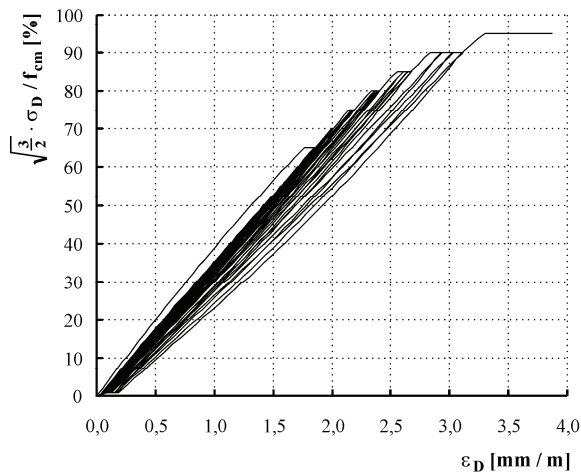
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



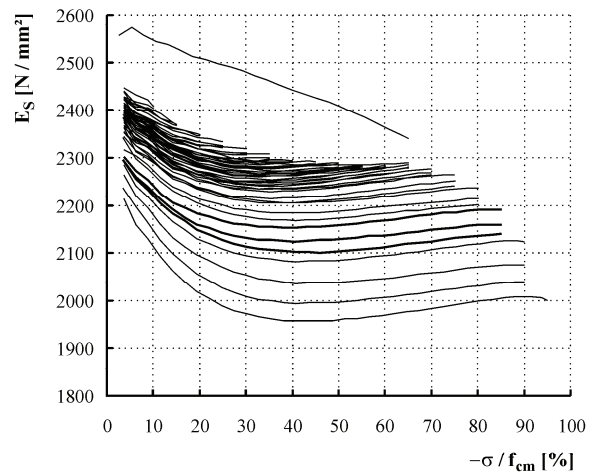
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel A15: Probekörper H V65-01 (Porenbeton P4.4)

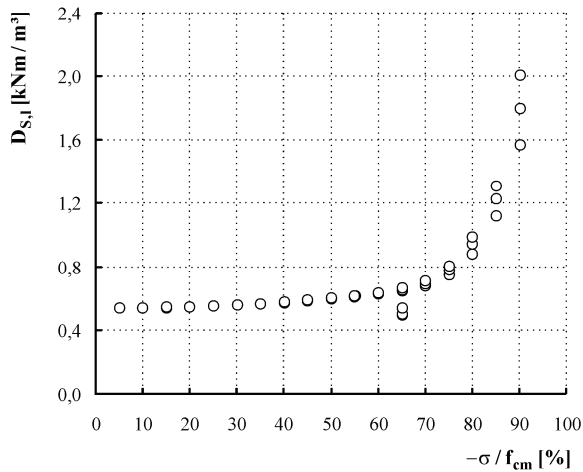
- Fortsetzung -



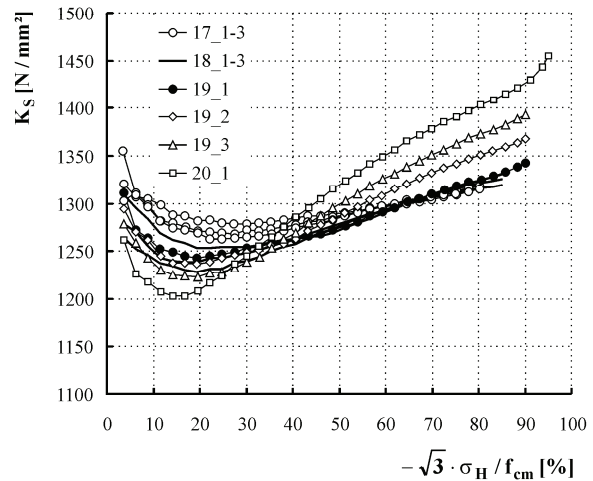
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



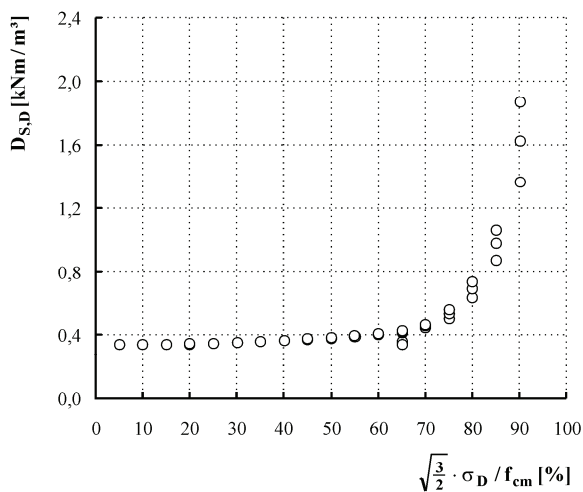
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade



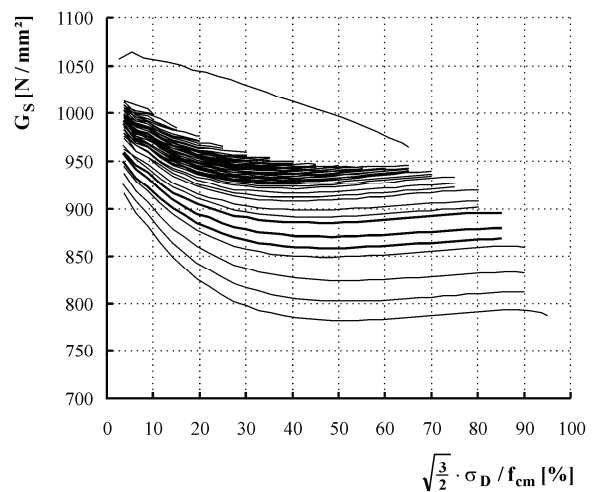
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade ausgewählter Zyklen

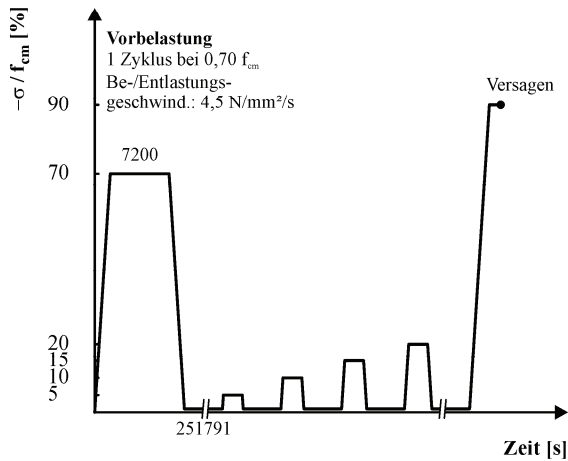


j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade

Tafel A16: Probekörper H 155 (Porenbeton P4.4)



schrittweise gesteigerte Belastung nach Vorbelastung
(Angaben zur Vorbelastung siehe links)

Material: Porenbeton P4.4

Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: $0,015 \text{ N/mm}^2/\text{s}$

Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 1800 s / 3600 s

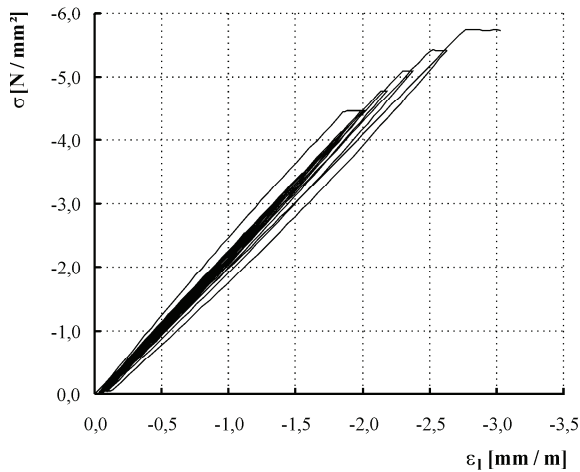
Grundlast: 1 kN

Laststufendifferenz: $0,05 f_{cm}$

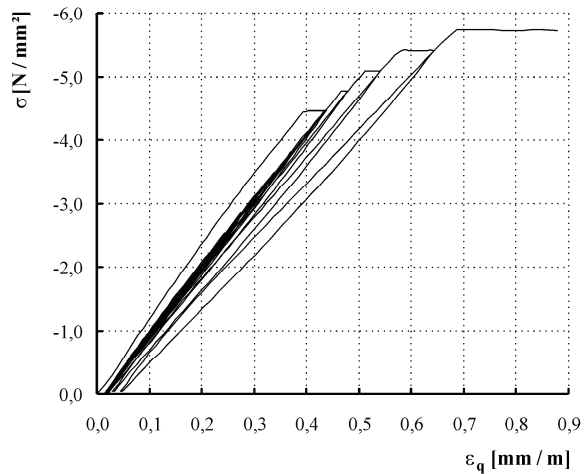
Zyklen je Laststufe: 1

Versagen bei Versuchsende

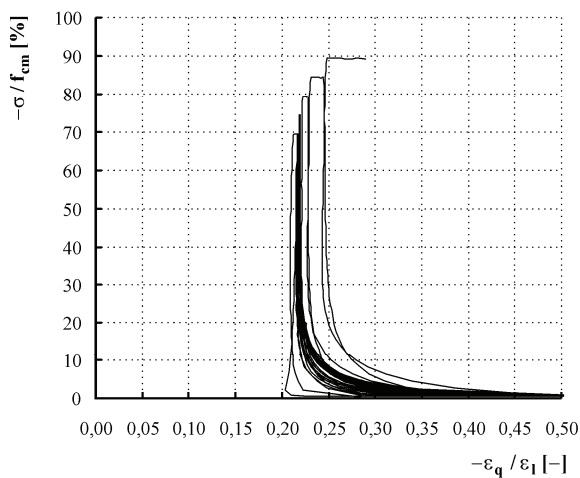
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



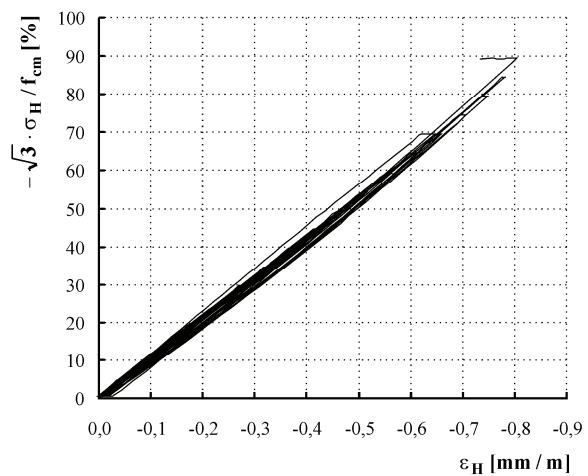
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



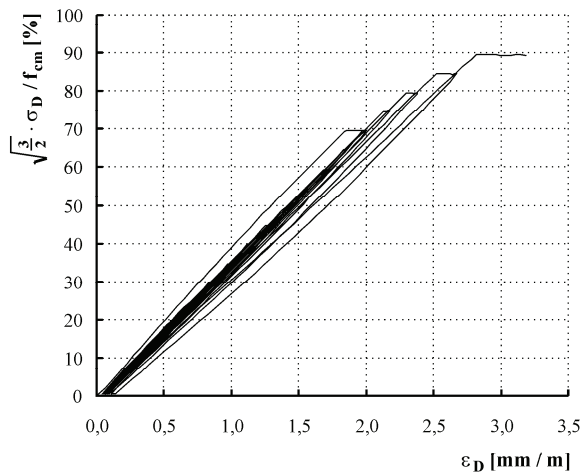
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



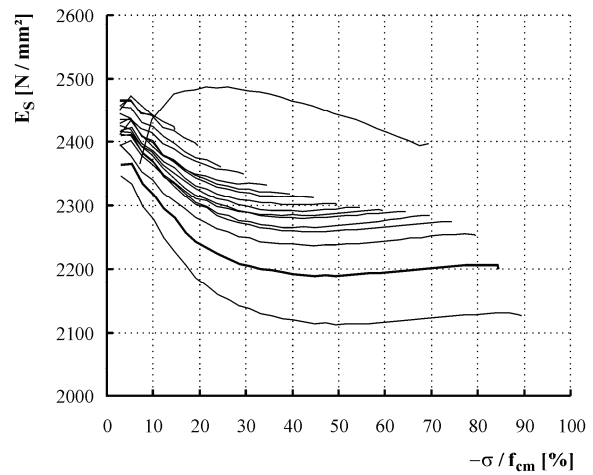
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel A16: Probekörper H 155 (Porenbeton P4.4)

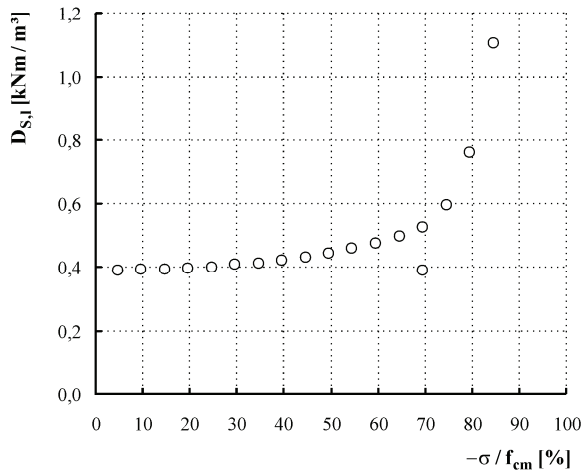
- Fortsetzung -



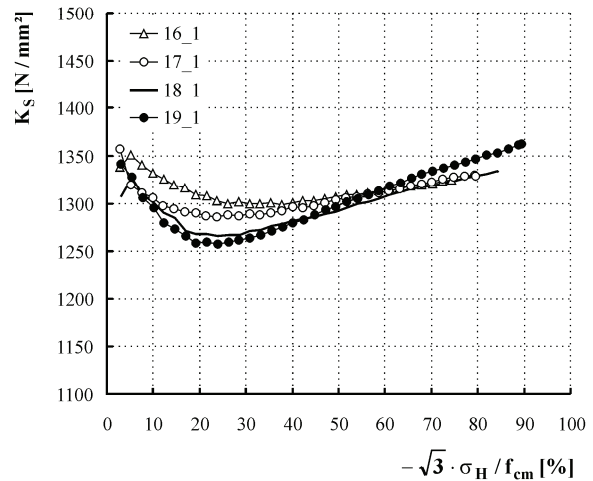
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



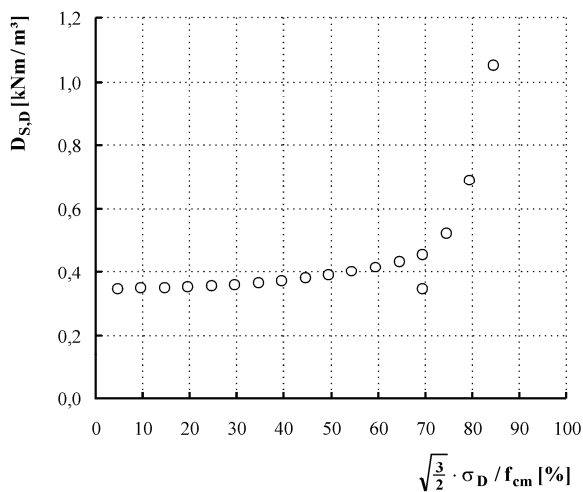
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade



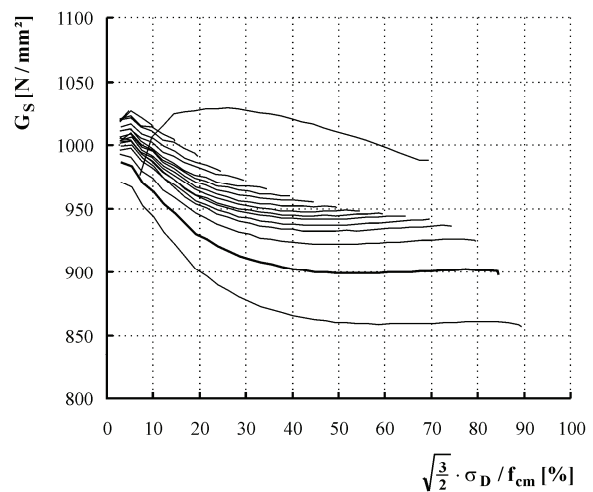
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade ausgewählter Zyklen

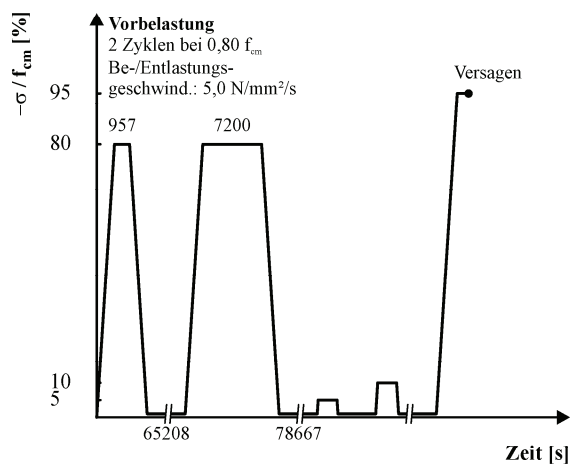


j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade

Tafel A17: Probekörper H 154 (Porenbeton P4.4)



schrittweise gesteigerte Belastung nach Vorbelastung
(Angaben zur Vorbelastung siehe links)

Material: Porenbeton P4.4

Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: $0,015 \text{ N/mm}^2/\text{s}$

Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 1800 s / 3600 s

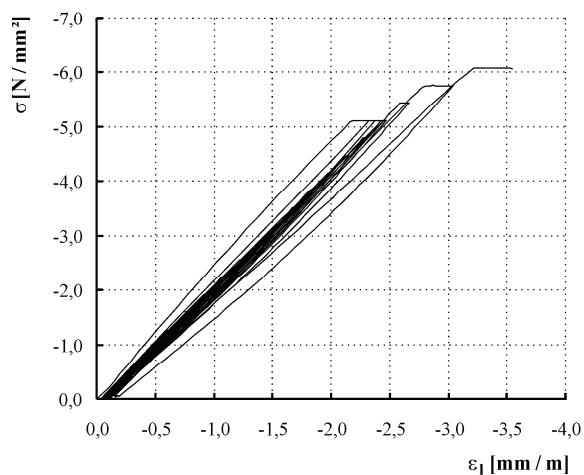
Grundlast: 1 kN

Laststufendifferenz: $0,05 f_{cm}$

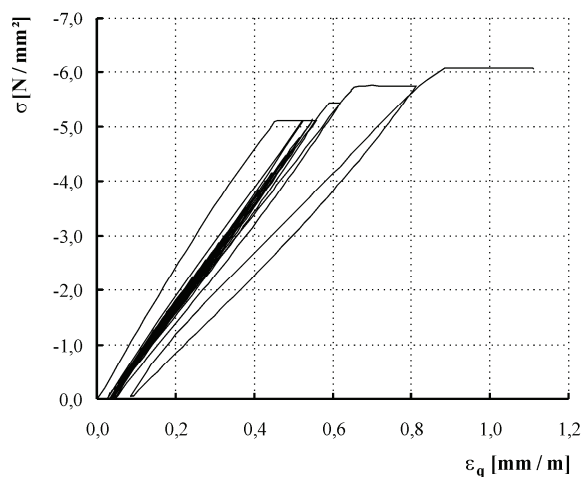
Zyklen je Laststufe: 1

Versagen bei Versuchsende

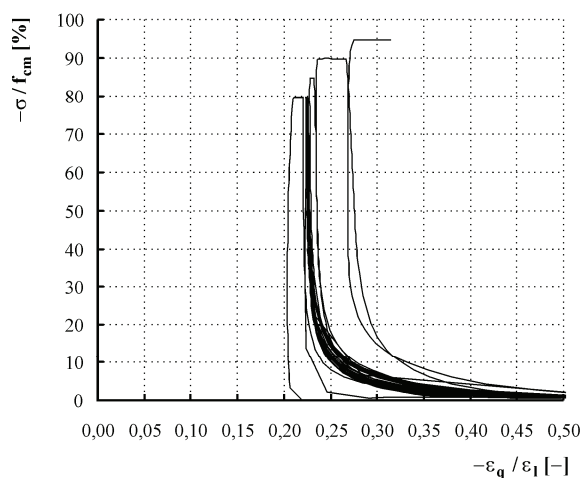
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



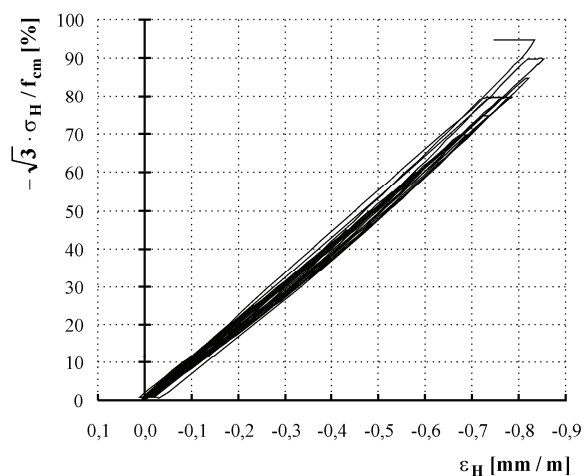
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



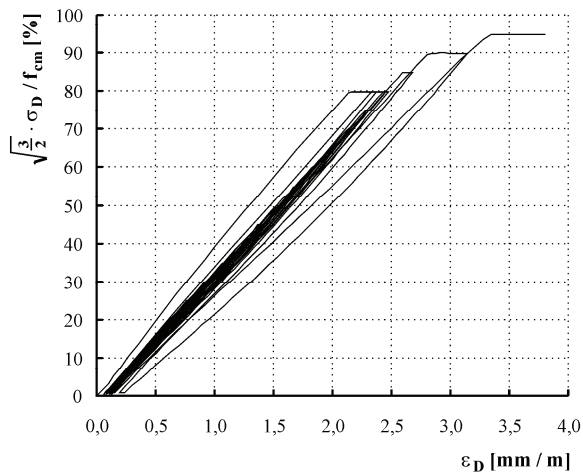
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



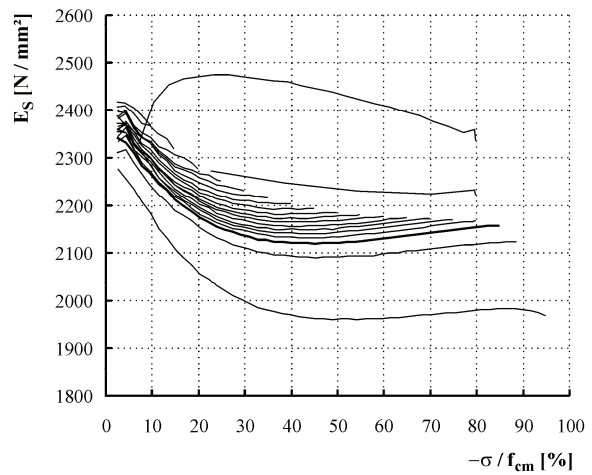
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel A17: Probekörper H 154 (Porenbeton P4.4)

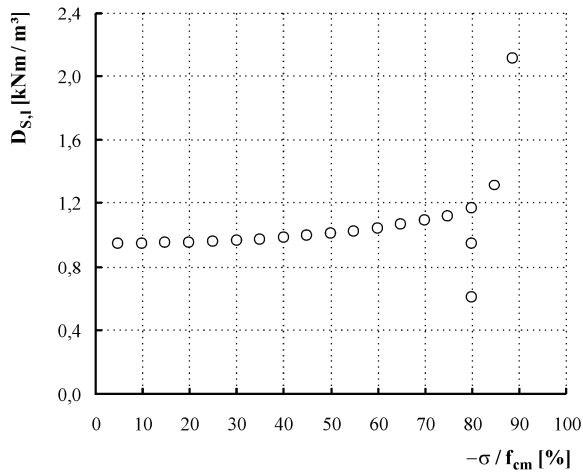
- Fortsetzung -



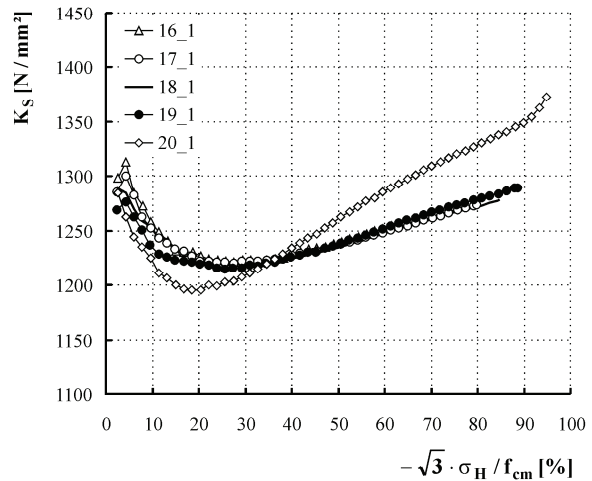
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



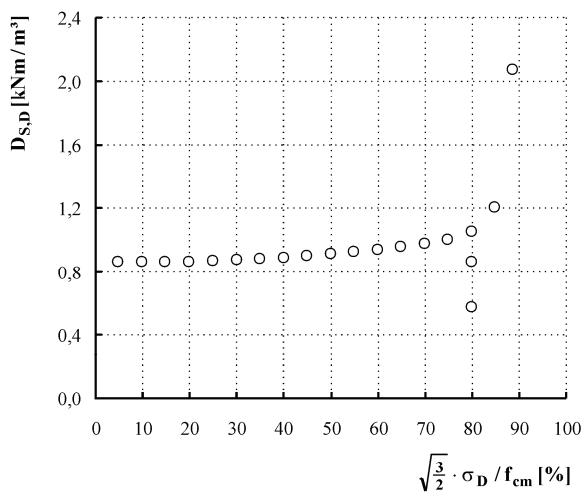
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade



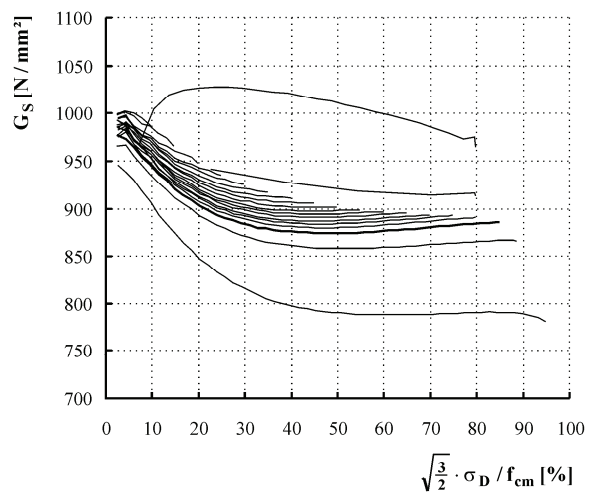
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade ausgewählter Zyklen

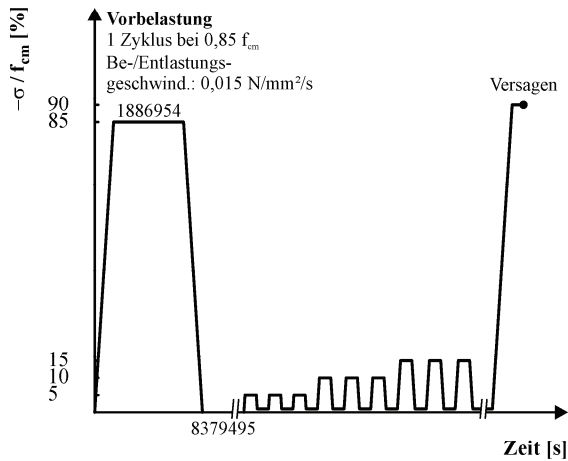


j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade

Tafel A18: Probekörper H V85-01 (Porenbeton P4.4)



schrittweise gesteigerte Belastung nach Vorbelastung
(Angaben zur Vorbelastung siehe links)

Material: Porenbeton P4.4

Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: $0,015 \text{ N/mm}^2/\text{s}$

Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 180 s

Grundlast: 1 kN

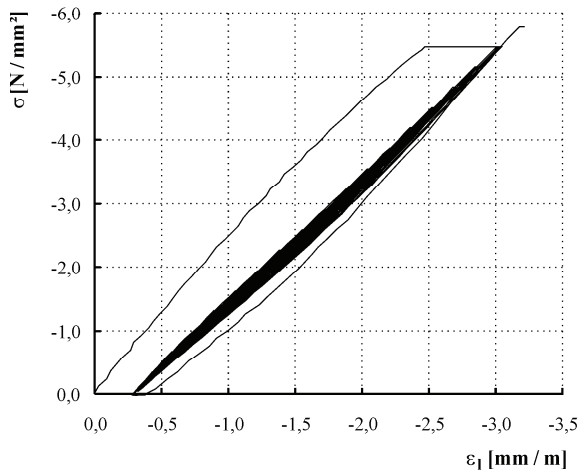
Laststufendifferenz: $0,05 f_{cm}$

Zyklen je Laststufe: 3

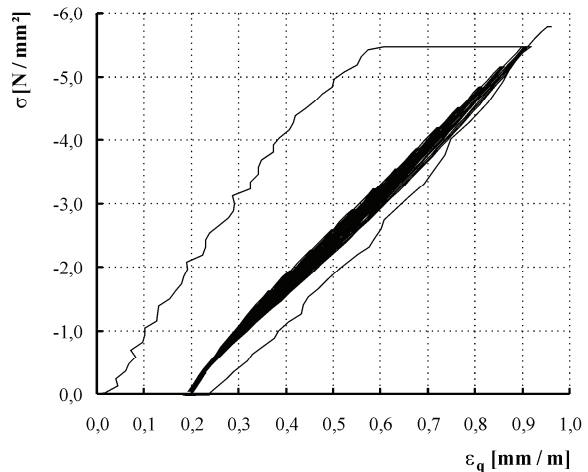
Versagen bei Versuchsende

Unregelmäßigkeiten bei Verformungsmessung

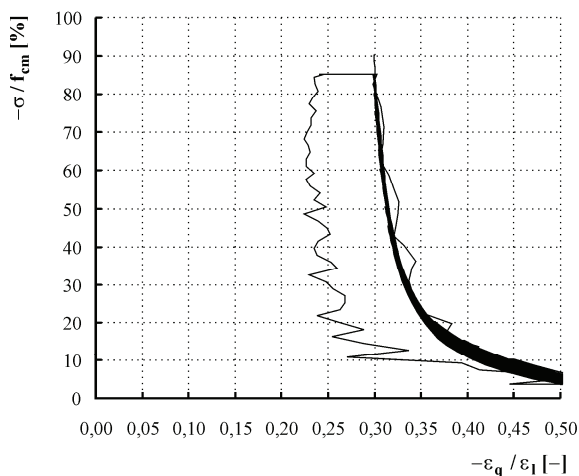
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



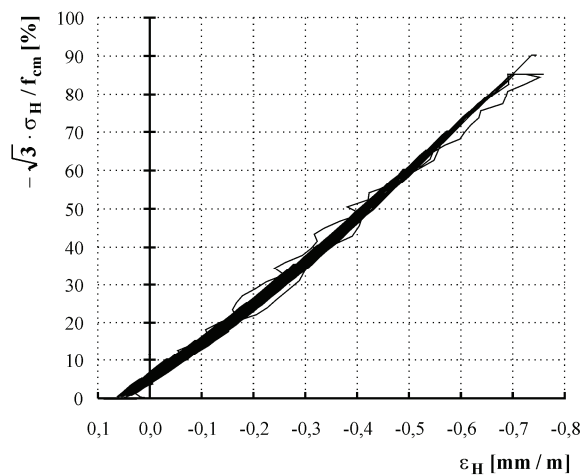
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



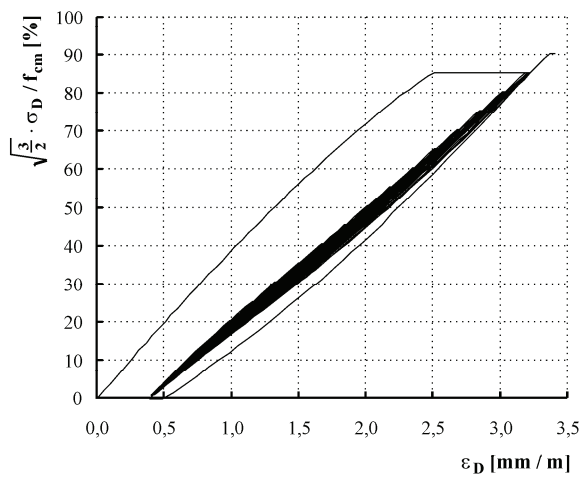
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



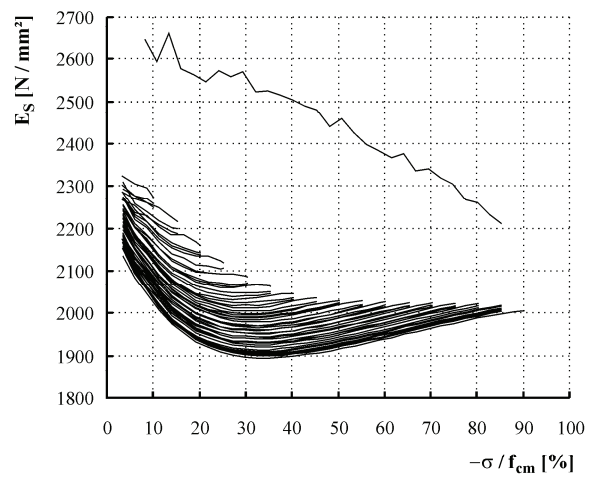
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel A18: Probekörper H V85-01 (Porenbeton P4.4)

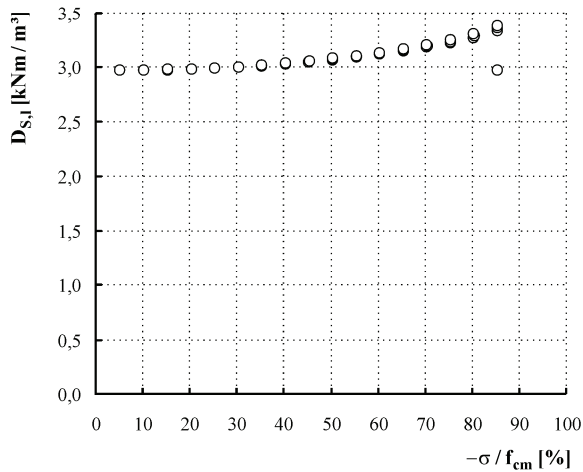
- Fortsetzung -



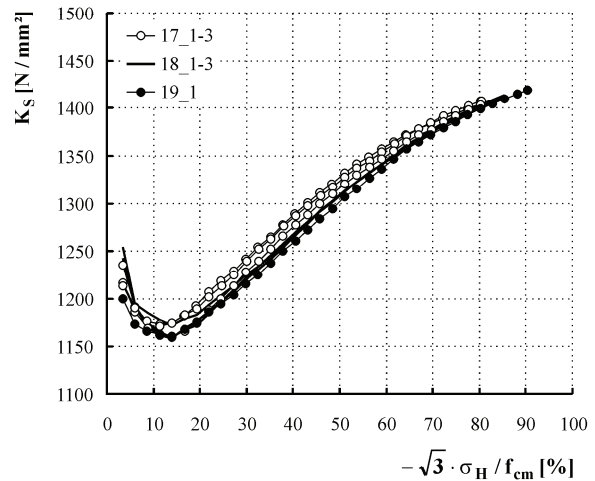
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



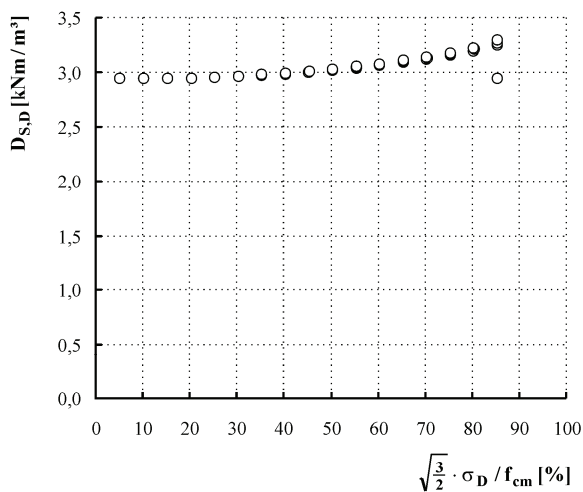
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade



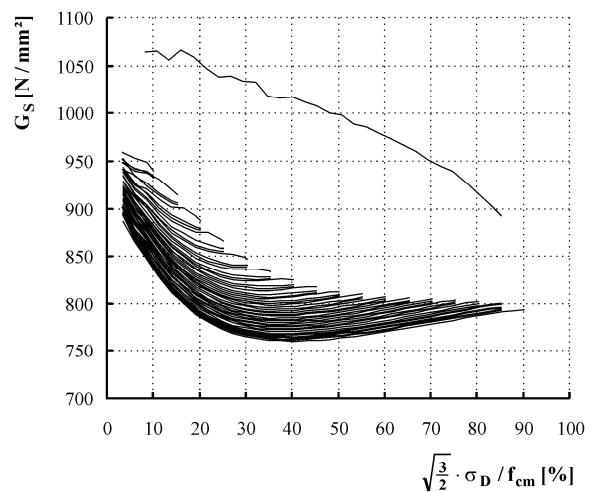
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade ausgewählter Zyklen



j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade

Anhang B: Probekörper aus Porenbeton, Serie 2

Die klimatischen Verhältnisse sind in Anhang A, Abb. A1 dargestellt.

Tab. B1: Versuchsergebnisse, Werte bei maximaler Druckkraft

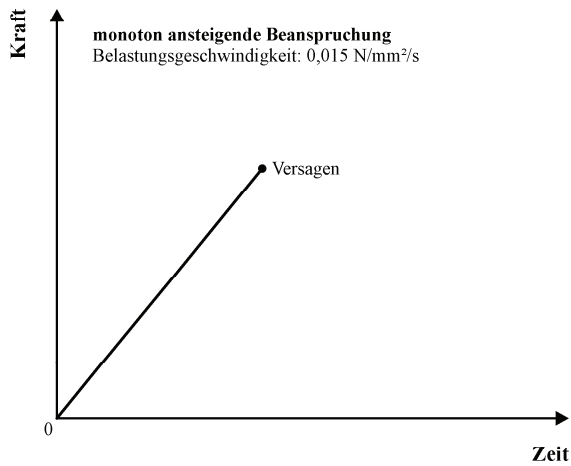
Probe	Umfang	Beanspruchungs- geschwindigkeit	Kraft	Spannung	Beanspruchungs- intensität	Längs- dehnung	Quer- dehnung
[Kommentar]	u	σ / t	F	σ	$-\sigma / f_{cm}$	ε_l	ε_q
<i>kraftgeregelt</i>	[mm]	[N/mm ² /s]	[kN]	[N/mm ²]	[%]	[mm/m]	[mm/m]
Y 100-01	472	0,015	-98,27	-5,54	101,1	3,44	1,24
Y 100-02	473	0,015	-98,24	-5,52	100,6	3,62	1,04
Y 100-03	472	0,015	-88,97	-5,02	91,5	-	-
Y 100-04	473	0,015	-98,89	-5,55	101,3	-	-
Y 100-05	471	0,015	-100,00	-5,66	103,3	-	-
Y 100-06	472	0,015	-98,05	-5,53	100,9	3,25	0,87
Y 100-07	472	0,015	-99,86	-5,63	102,7	-	-
Y 100-08	472	0,015	-97,89	-5,52	100,7	-	-
Y 100-09	472	0,015	-94,33	-5,32	97,0	-	-
Y 100-10	472	0,015	-97,89	-5,52	100,7	-	-

Tab. B2: Versuchsergebnisse, Endwerte vor Versagen bzw. unmittelbar vor Entlastung

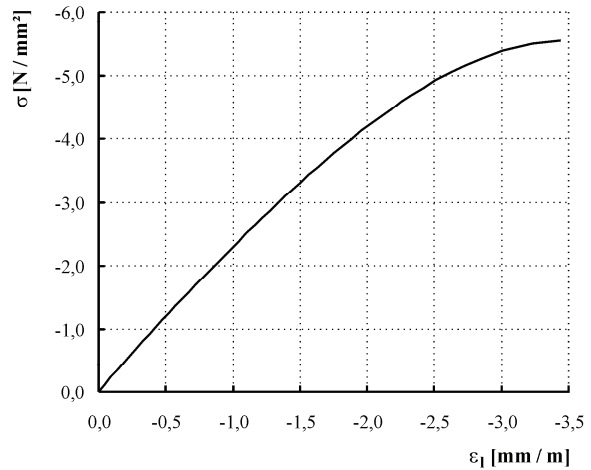
Probe	Umfang	Kraft	Spannung	Beanspruchungs- intensität	Längs- dehnung	Quer- dehnung	Haltezeit
[Kommentar]	u	F	σ	$-\sigma / f_{cm}$	ε_l	ε_q	t
	[mm]	[kN]	[N/mm ²]	[%]	[mm/m]	[mm/m]	[h:min:s]
<i>mit Versagen</i>							
Y 95-01	472	-92,05	-5,19	94,7	-3,23	0,67	0:00:19
Y 90-01	472	-87,25	-4,92	89,8	-3,29	1,20	0:17:50
Y 90-02	473	-87,42	-4,91	89,6	-3,22	0,99	1:02:40
Y 90-03	472	-87,29	-4,92	89,8	-3,23	1,04	0:44:27
Y 88-01	472	-85,43	-4,82	87,9	-2,97	0,96	0:57:14
Y 88-02	474	-85,42	-4,78	87,1	-2,99	1,34	0:13:05
Y 88-03, Zyklus 4 [1]	474	-85,30	-4,77	87,0	-3,04	0,89	3:41:38
<i>ohne Versagen</i>							
Y 86-02	472	-83,38	-4,70	85,8	-2,63	0,78	2:16:52
Y 85-02	473	-82,73	-4,65	84,8	-2,76	0,66	1490:48:02
Y 88-03, Zyklus 3 [1]	474	-83,34	-4,66	85,0	-2,83	0,77	24:18:29
Y 88-03, Zyklus 2 [1]	474	-82,38	-4,61	84,0	-2,69	0,69	91:08:54

[1] vorbelastet

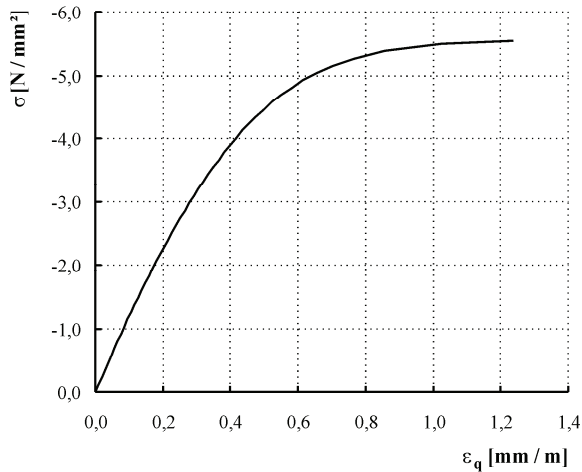
Tafel B1: Probekörper Y 100-01 (Porenbeton P4.4)



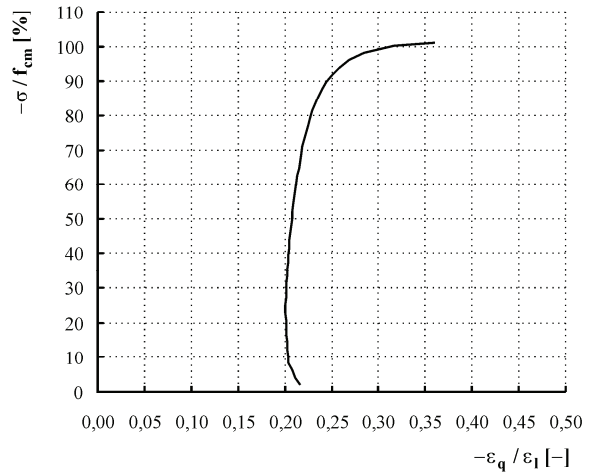
a) Belastungsregime, ergänzende Bemerkungen



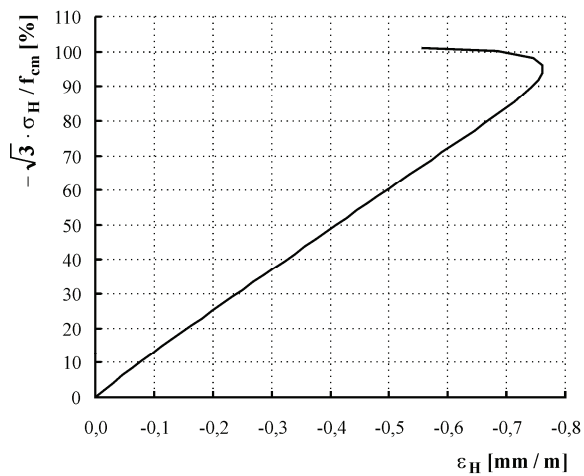
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



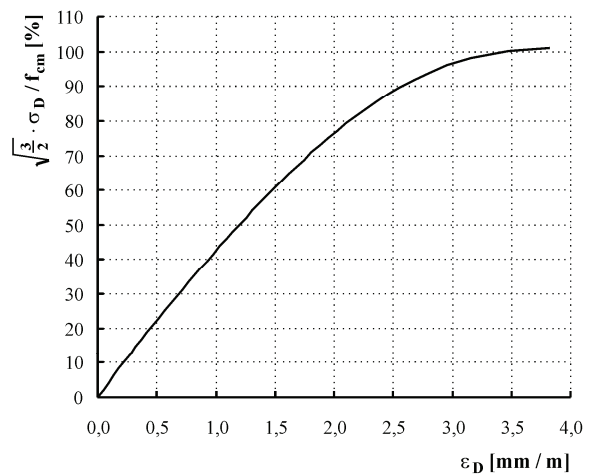
c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



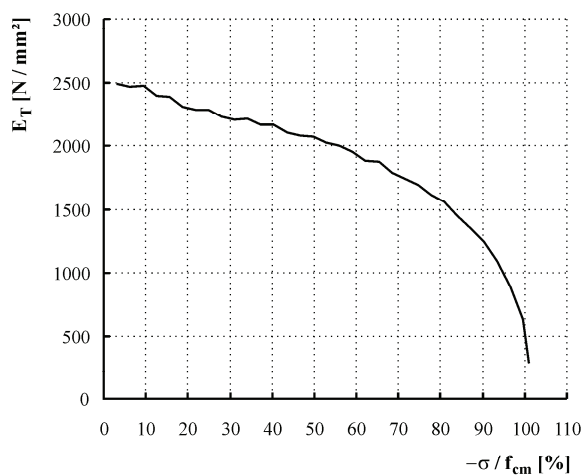
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



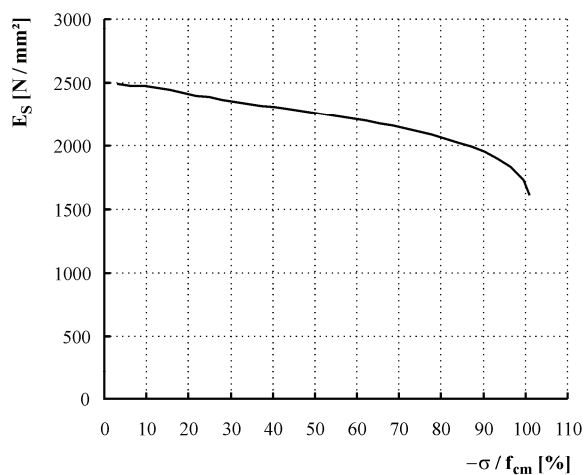
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel B1: Probekörper Y 100-01 (Porenbeton P4.4)

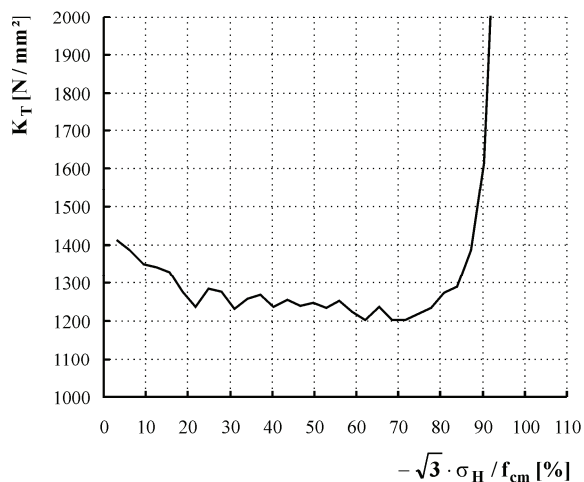
- Fortsetzung -



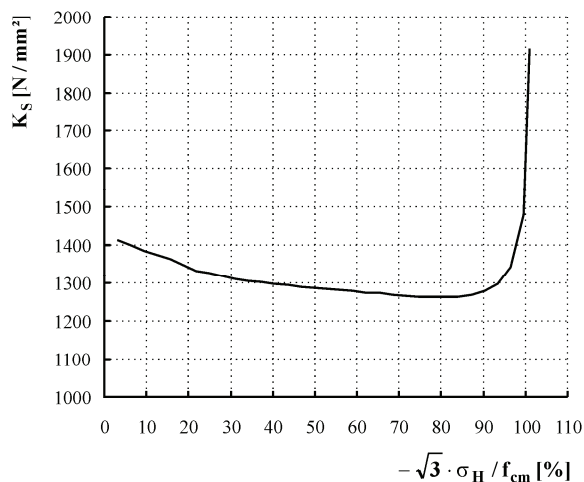
g) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



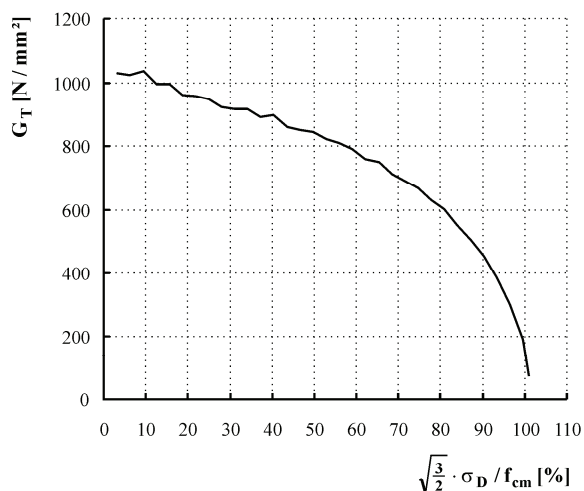
h) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)



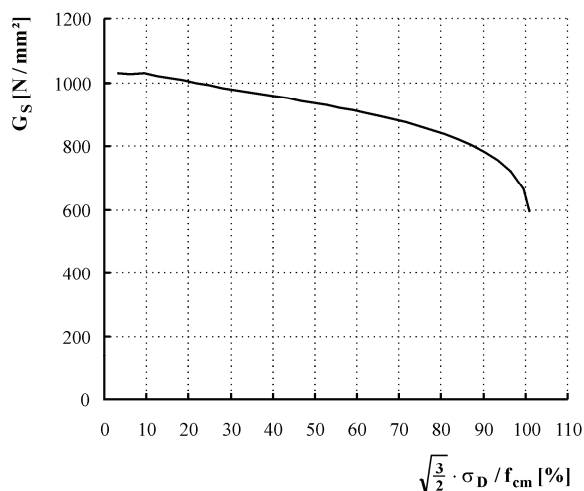
i) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



j) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

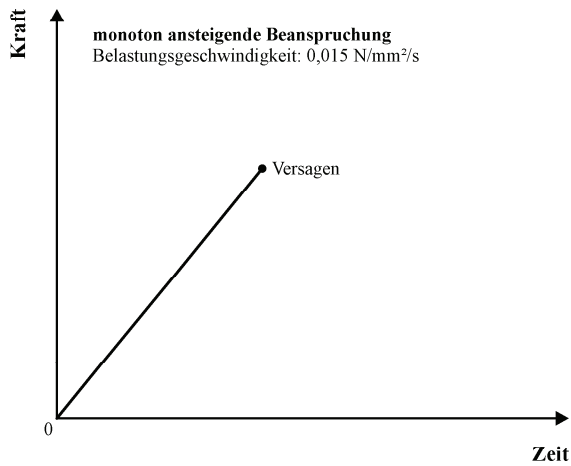


k) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)

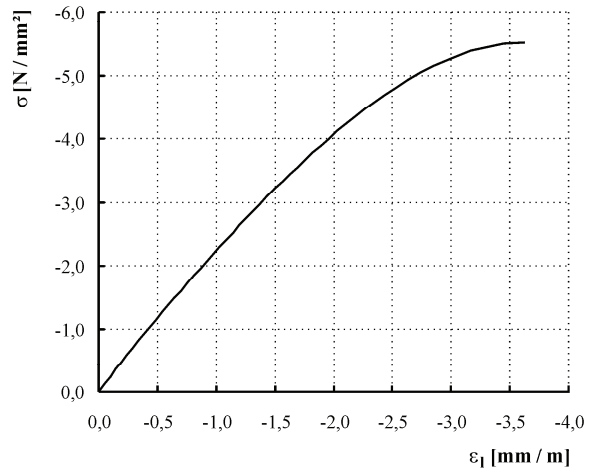


l) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

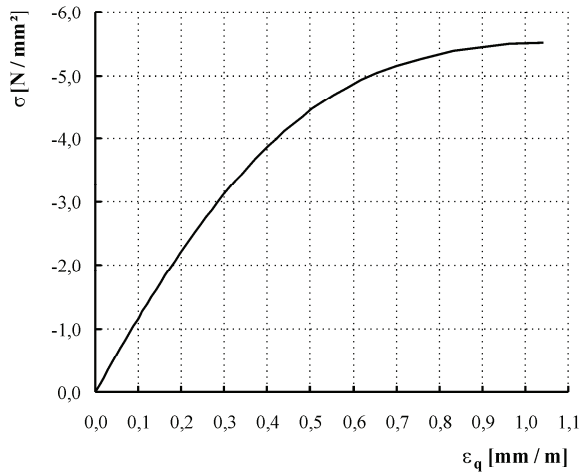
Tafel B2: Probekörper Y 100-02 (Porenbeton P4.4)



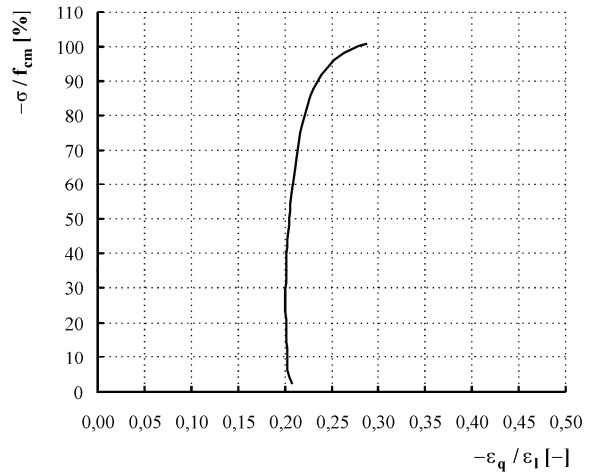
a) Belastungsregime, ergänzende Bemerkungen



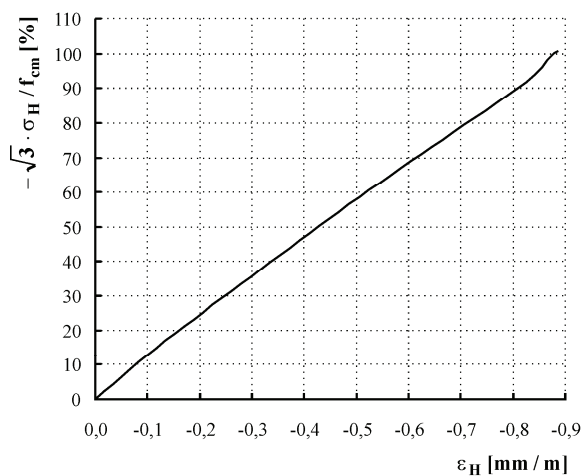
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



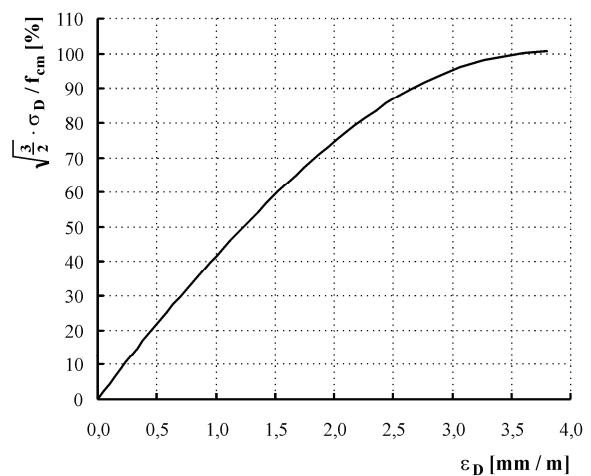
c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



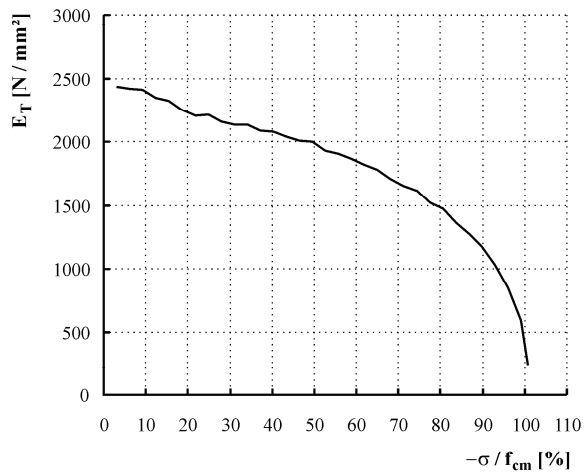
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



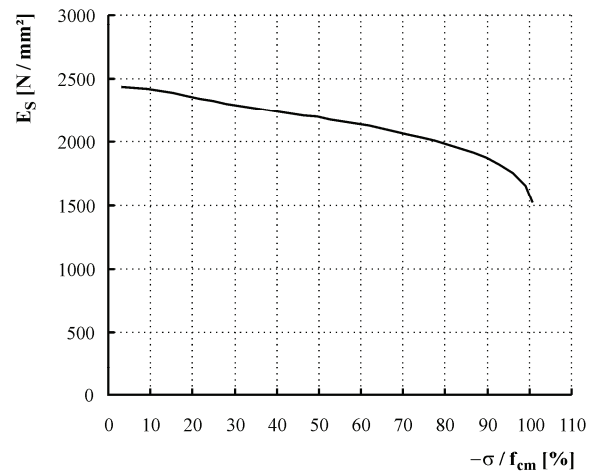
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel B2: Probekörper Y 100-02 (Porenbeton P4.4)

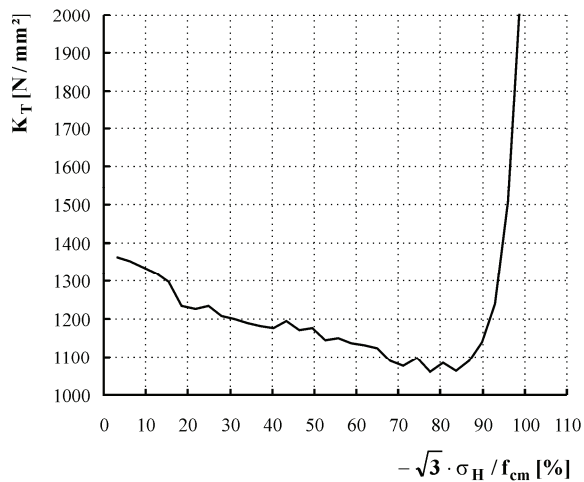
- Fortsetzung -



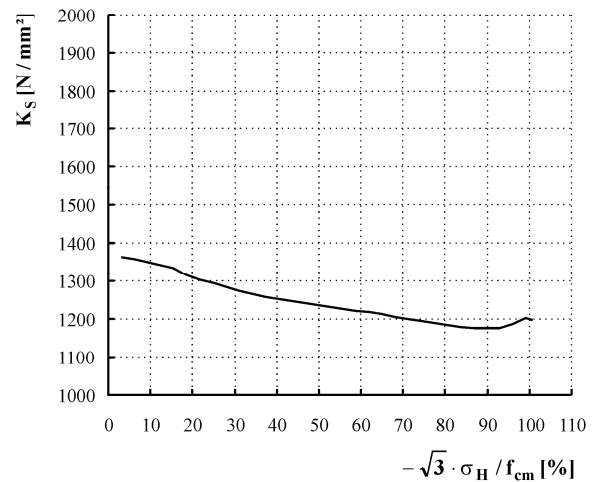
g) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



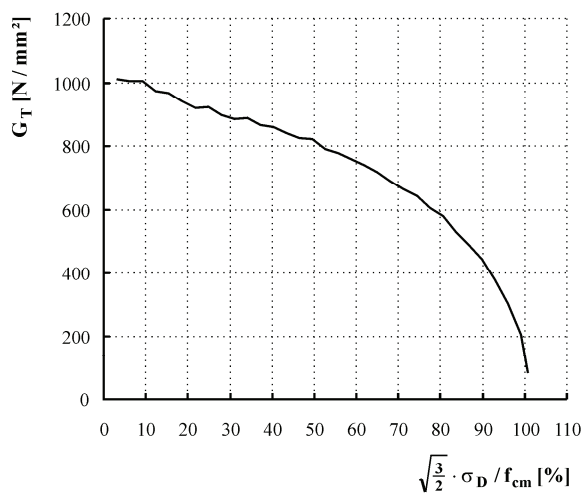
h) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)



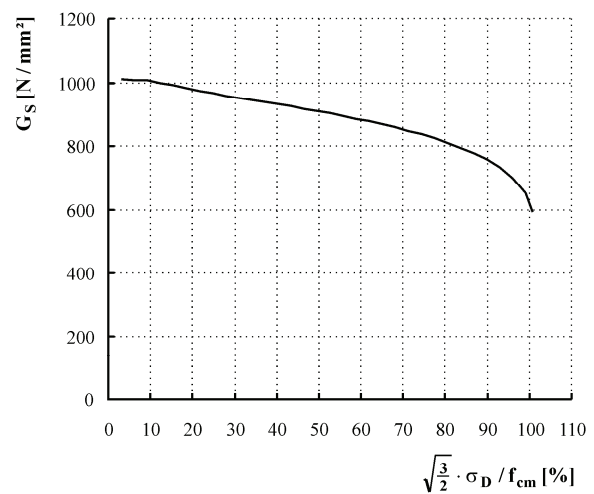
i) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



j) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

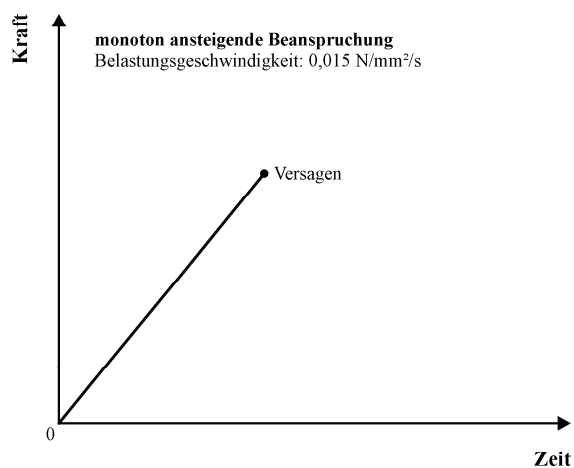


k) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)

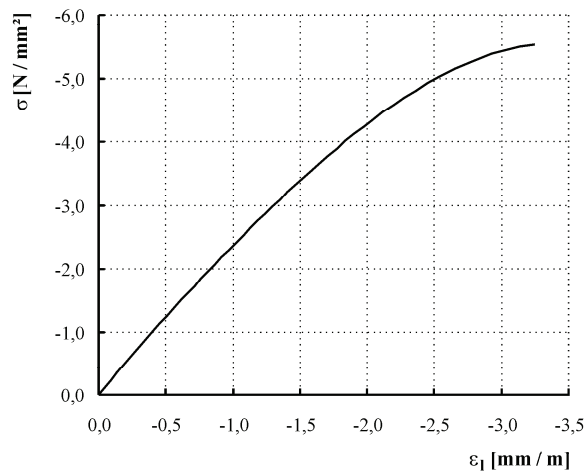


l) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

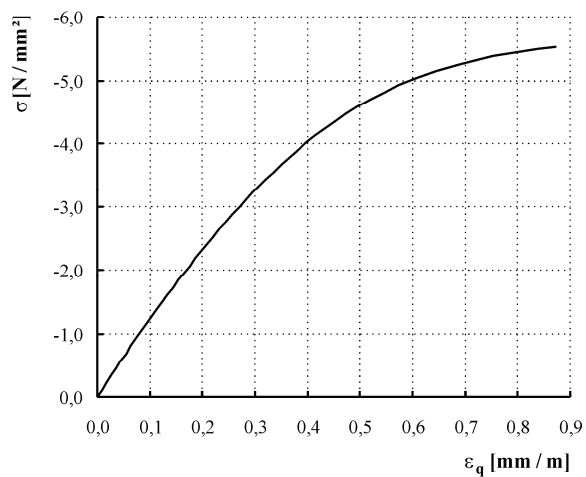
Tafel B3: Probekörper Y 100-06 (Porenbeton P4.4)



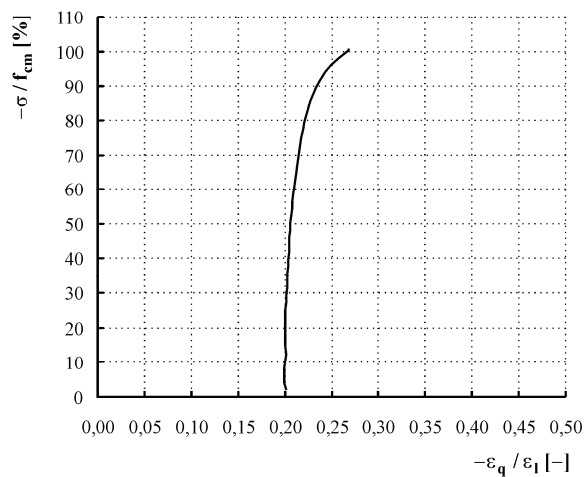
a) Belastungsregime, ergänzende Bemerkungen



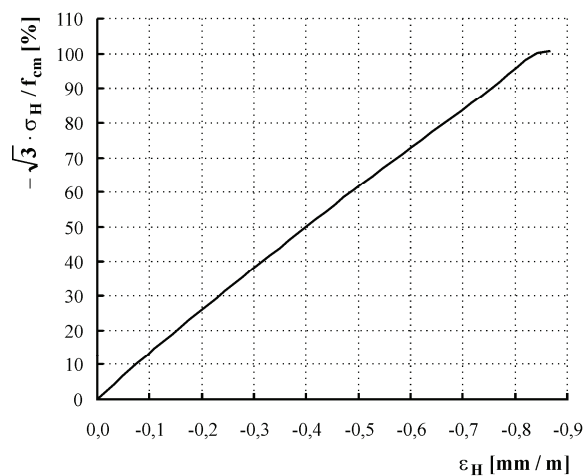
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



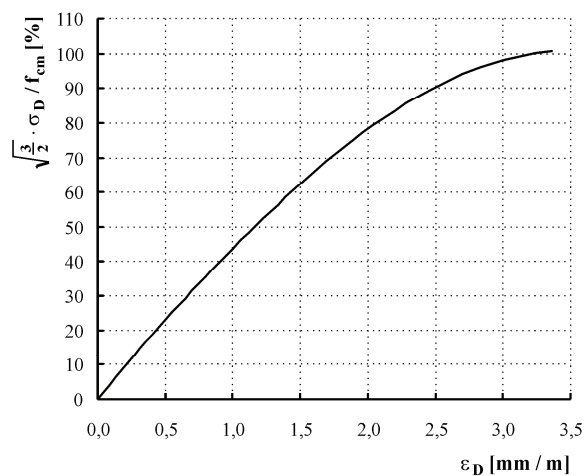
c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



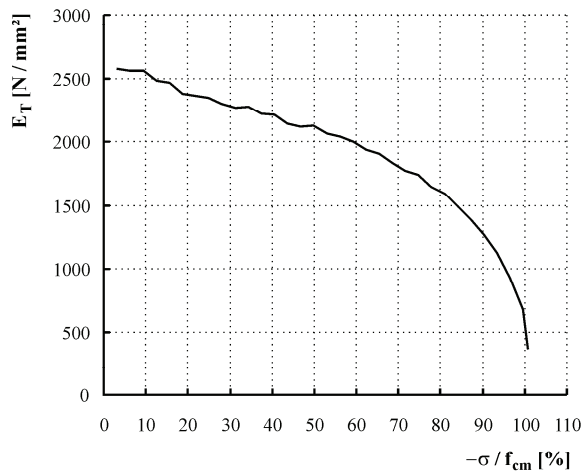
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



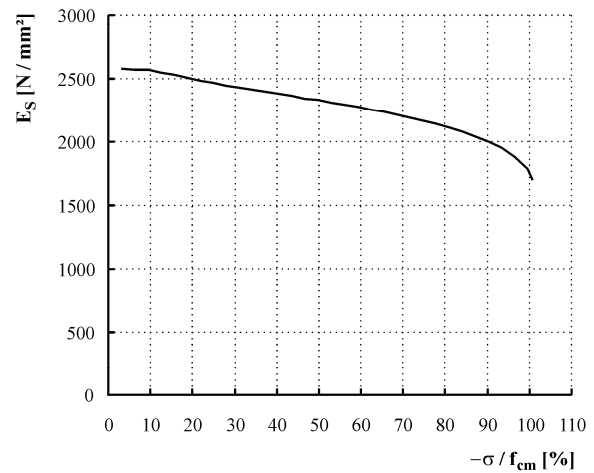
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel B3: Probekörper Y 100-06 (Porenbeton P4.4)

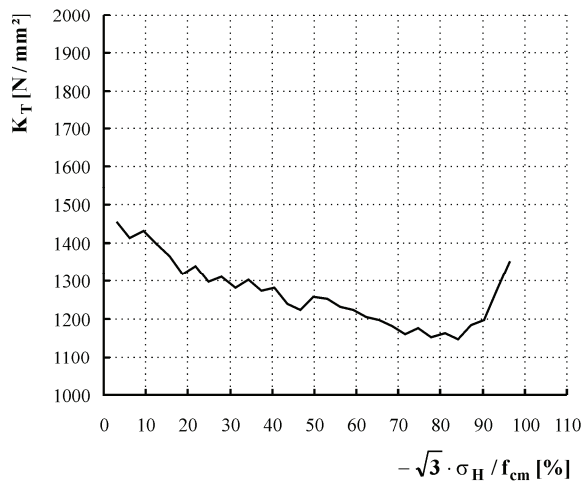
- Fortsetzung -



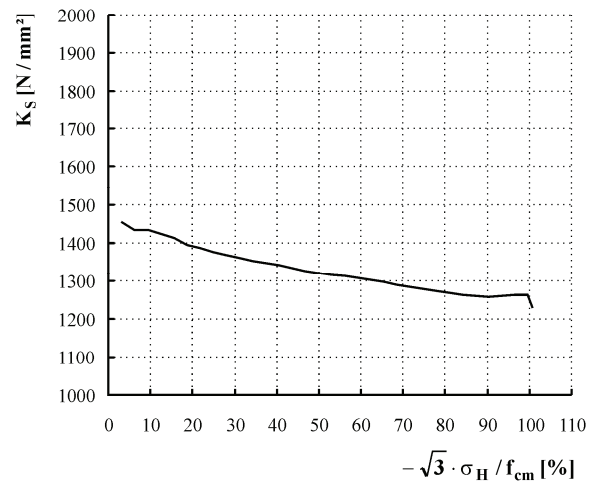
g) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



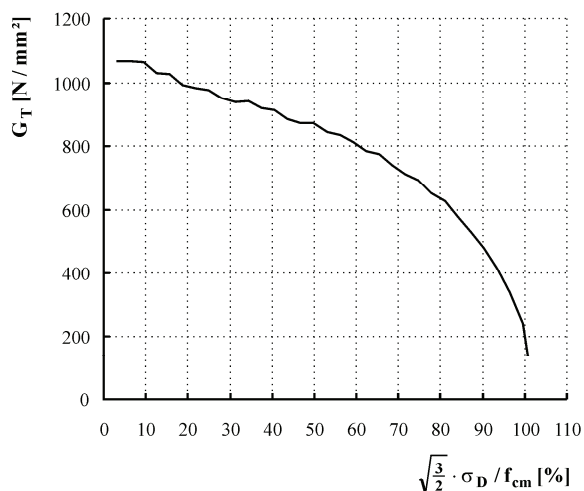
h) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)



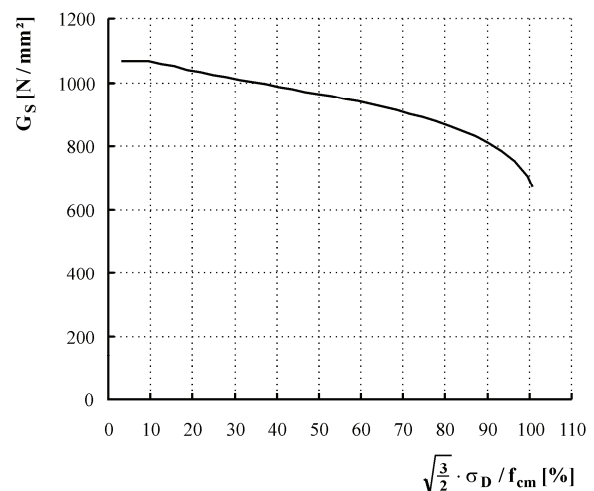
i) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



j) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

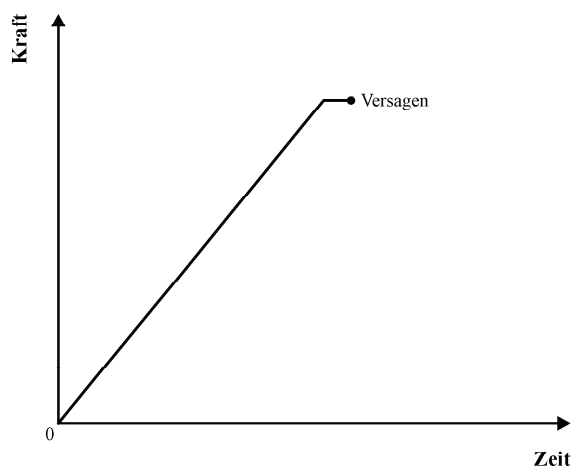


k) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



l) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

Tafel B4: Probekörper Y 95-01 (Porenbeton P4.4)



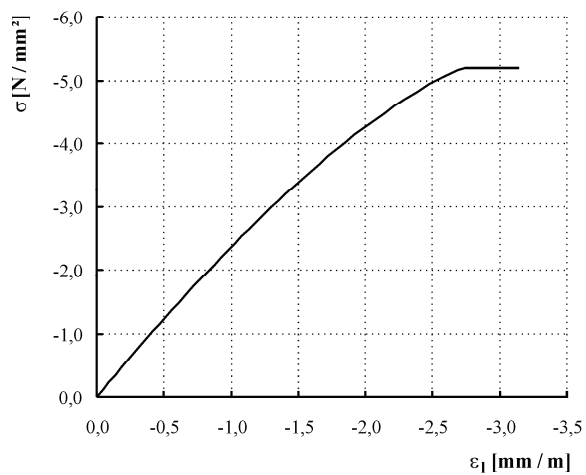
überwiegend ruhende Belastung

Material: Porenbeton P4.4

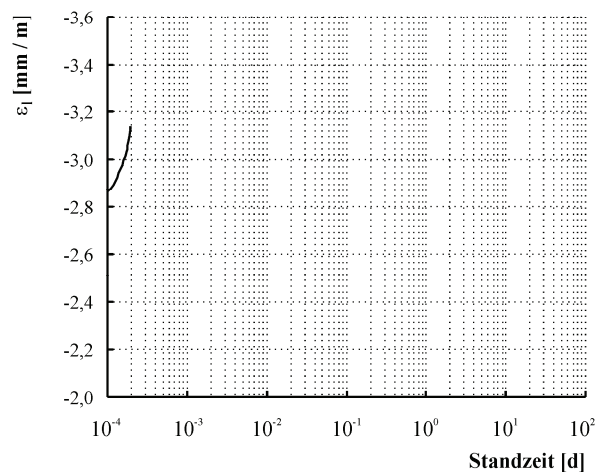
Belastungsgeschwindigkeit: 0,015 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,947 f_{cm}

ertragene Standzeit: 19 s

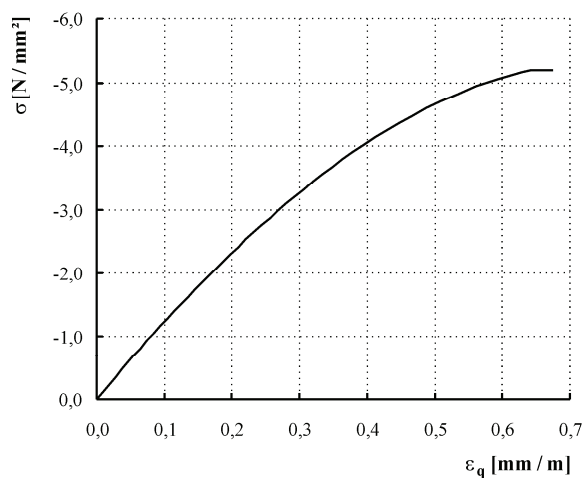
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



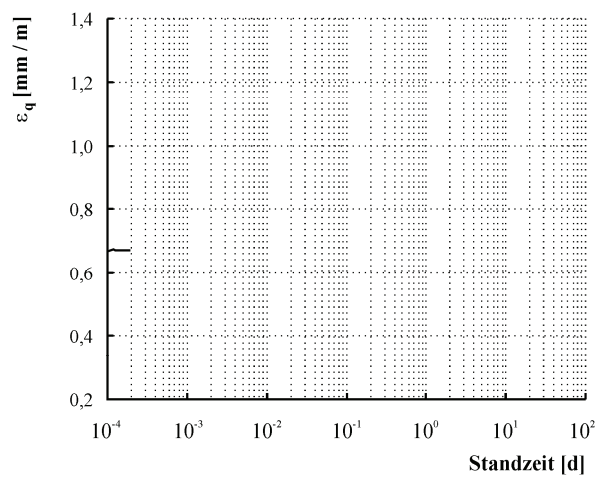
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



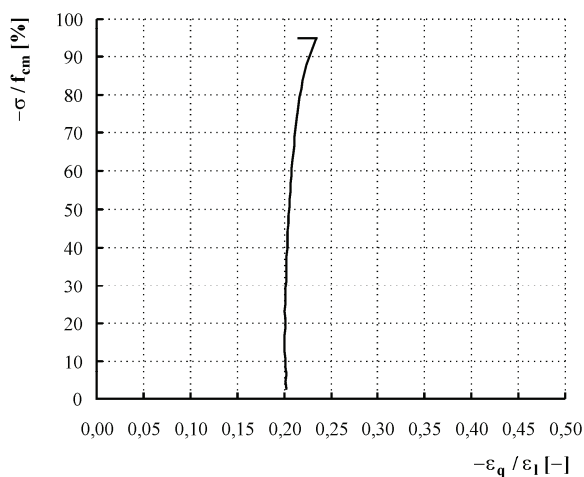
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



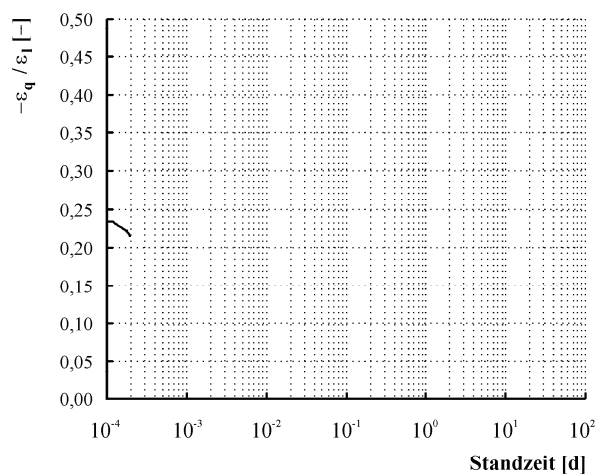
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B4: Probekörper Y 95-01 (Porenbeton P4.4)

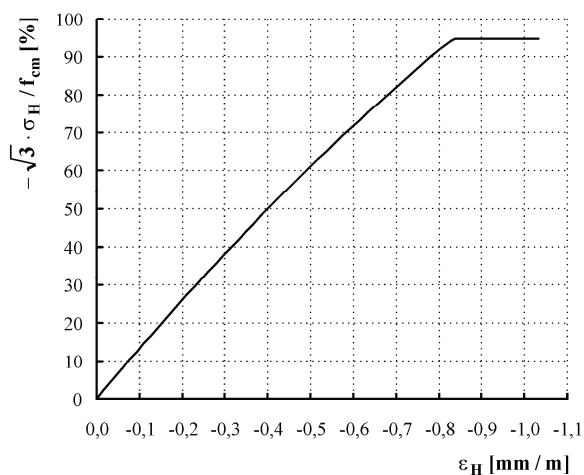
- Fortsetzung -



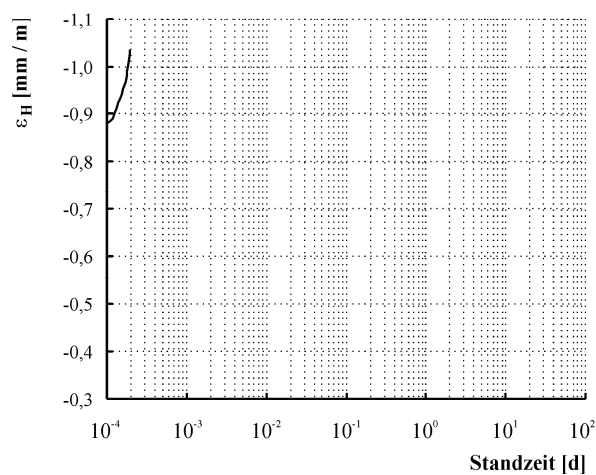
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



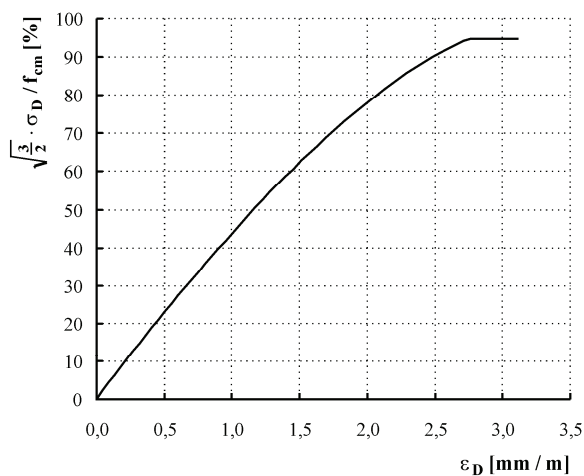
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



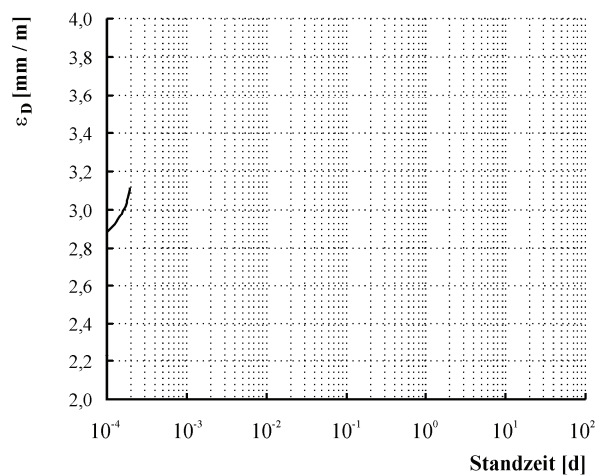
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

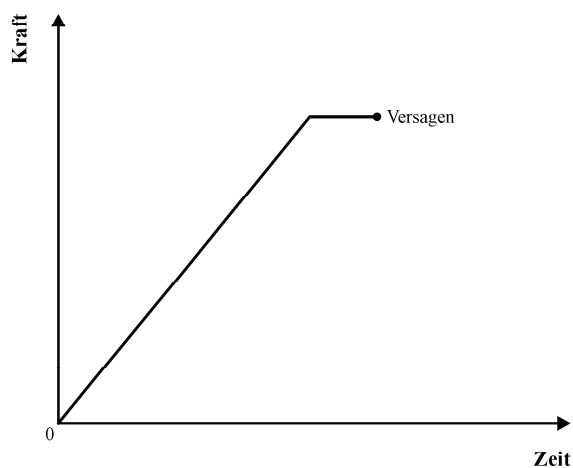


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B5: Probekörper Y 90-01 (Porenbeton P4.4)

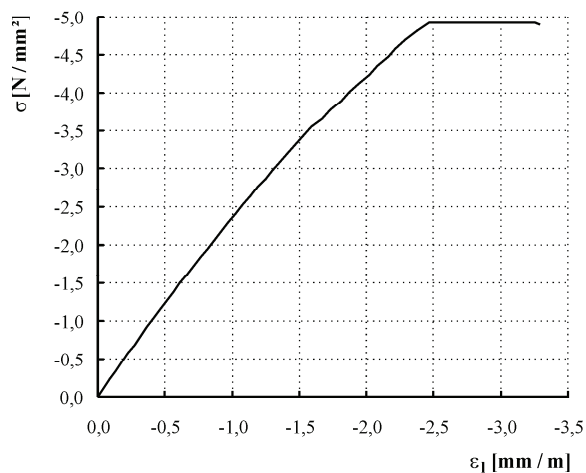
**überwiegend ruhende Belastung**

Material: Porenbeton P4.4

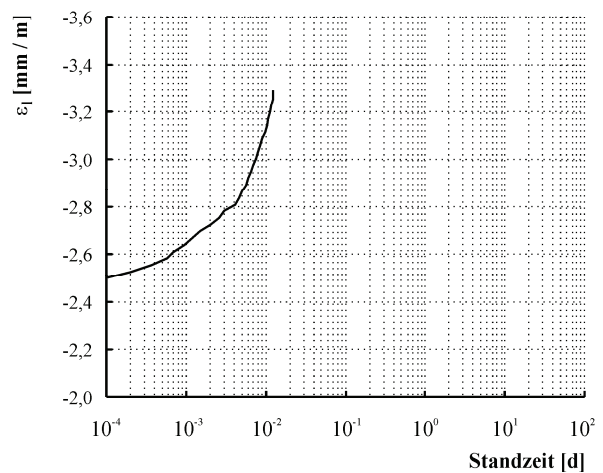
Belastungsgeschwindigkeit: 0,015 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,898 f_{cm}

ertragene Standzeit: 1070 s

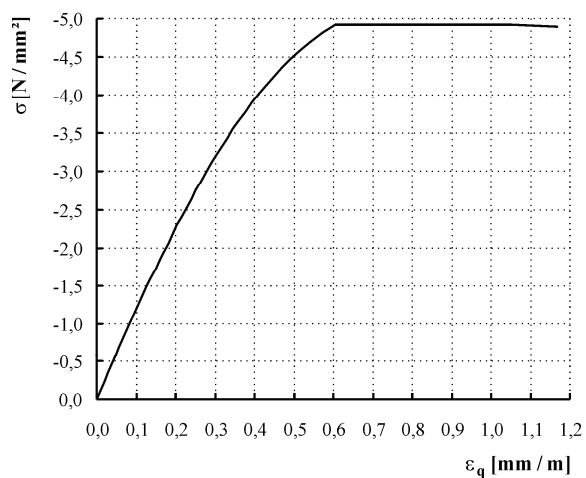
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



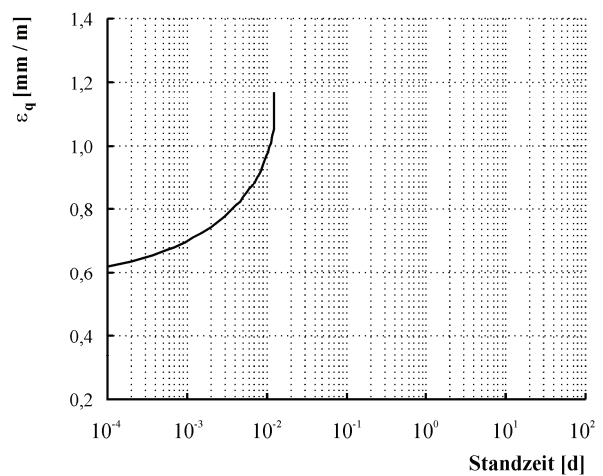
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



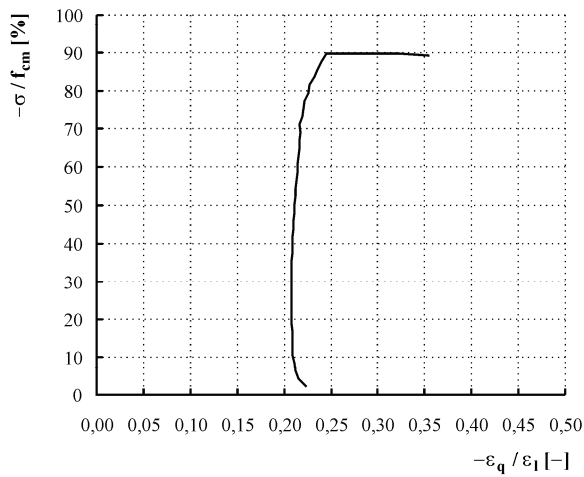
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



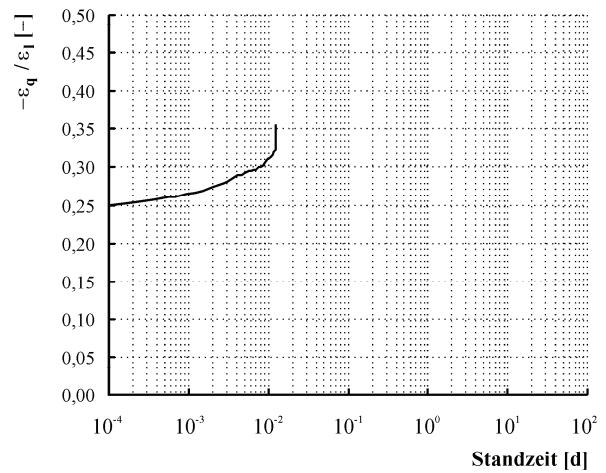
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B5: Probekörper Y 90-01 (Porenbeton P4.4)

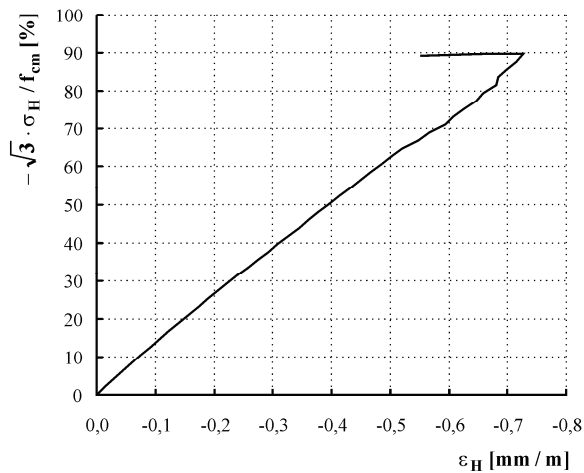
- Fortsetzung -



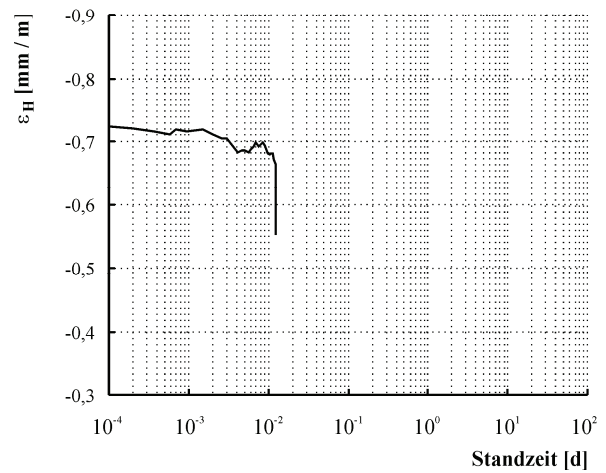
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



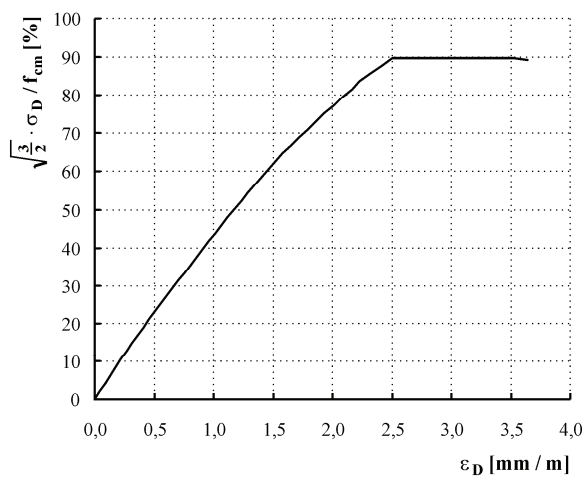
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



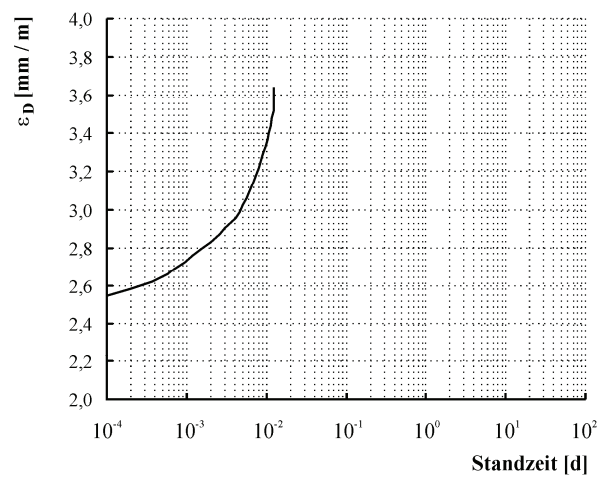
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

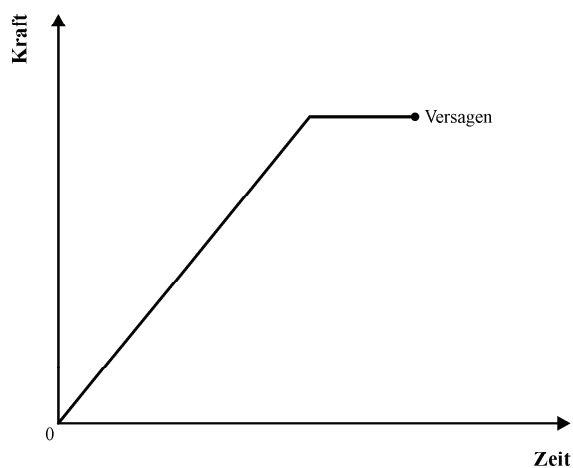


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B6: Probekörper Y 90-02 (Porenbeton P4.4)



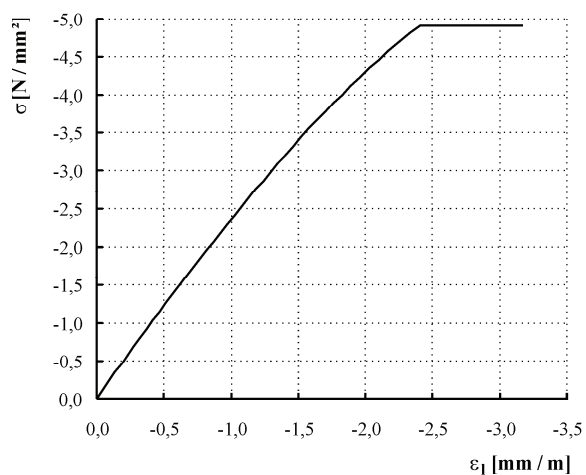
überwiegend ruhende Belastung

Material: Porenbeton P4.4

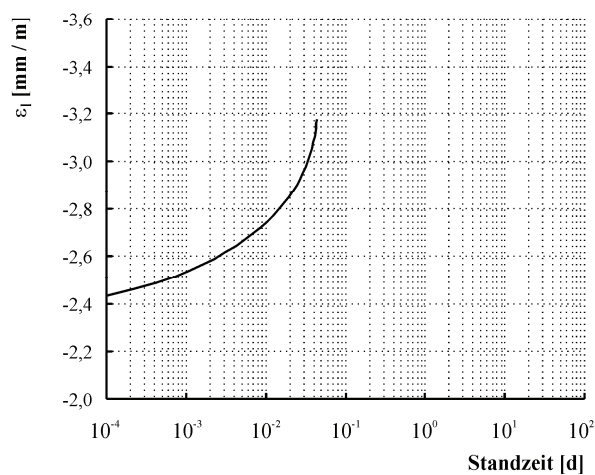
Belastungsgeschwindigkeit: 0,015 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,896 f_{cm}

ertragene Standzeit: 3760 s

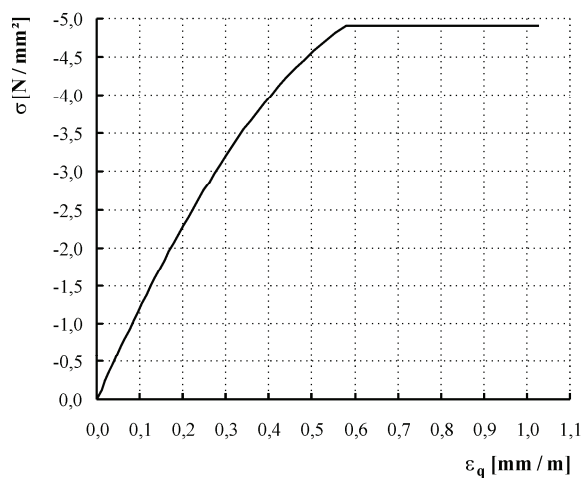
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



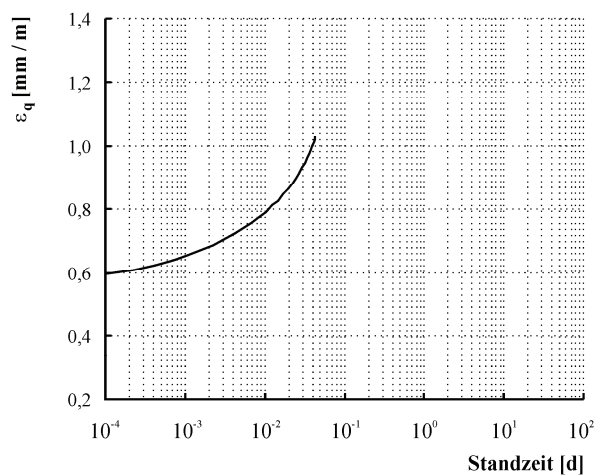
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



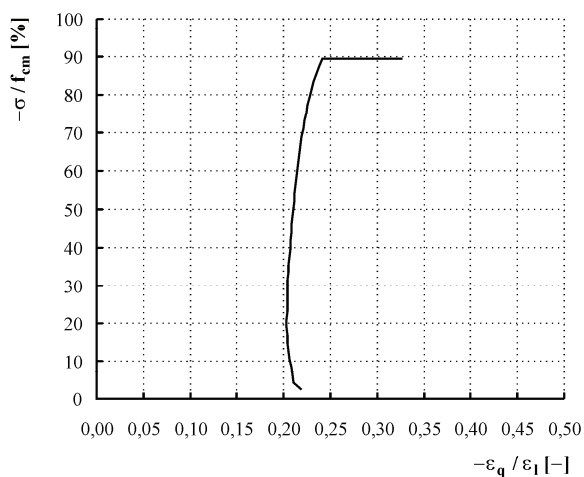
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



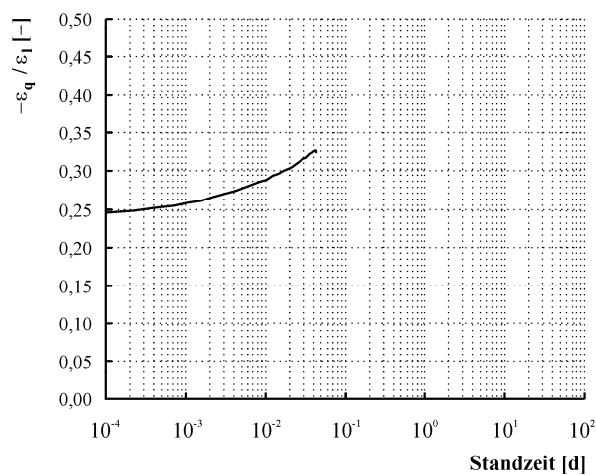
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B6: Probekörper Y 90-02 (Porenbeton P4.4)

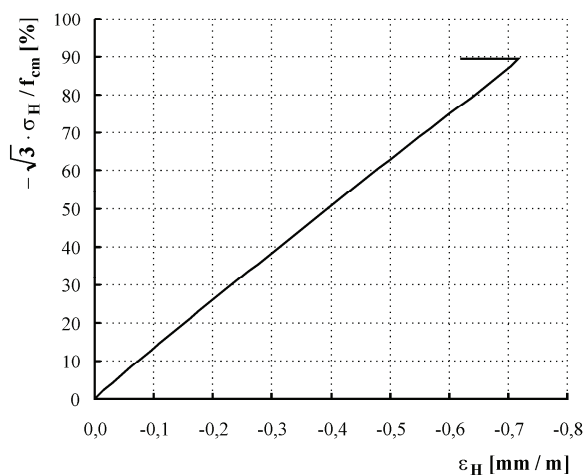
- Fortsetzung -



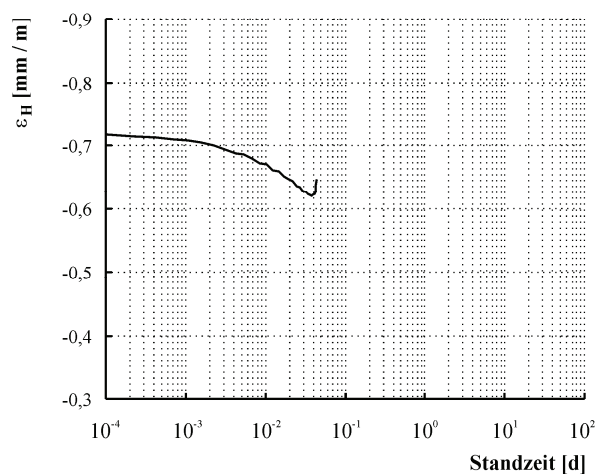
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



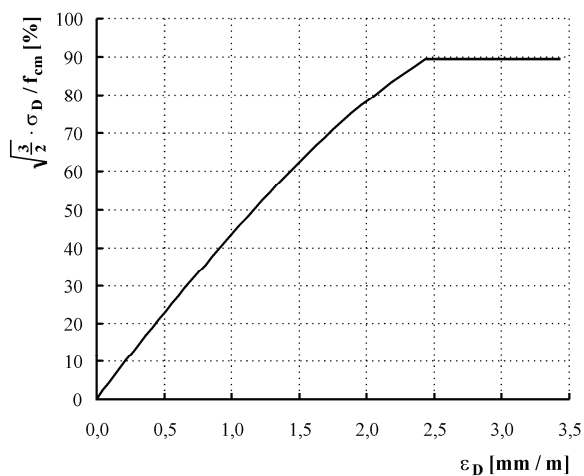
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



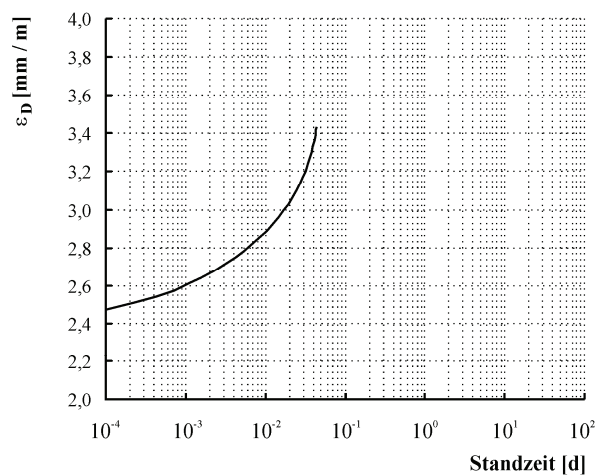
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

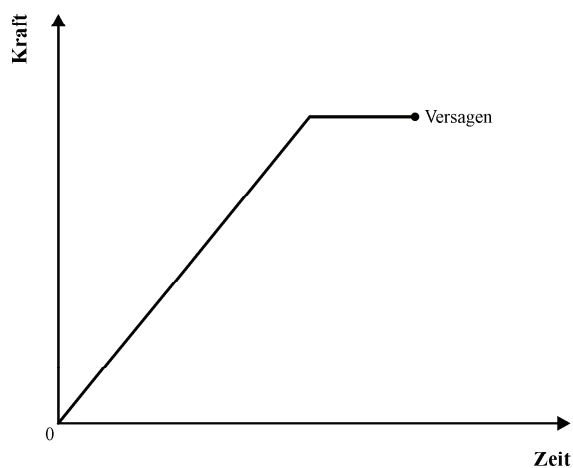


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B7: Probekörper Y 90-03 (Porenbeton P4.4)



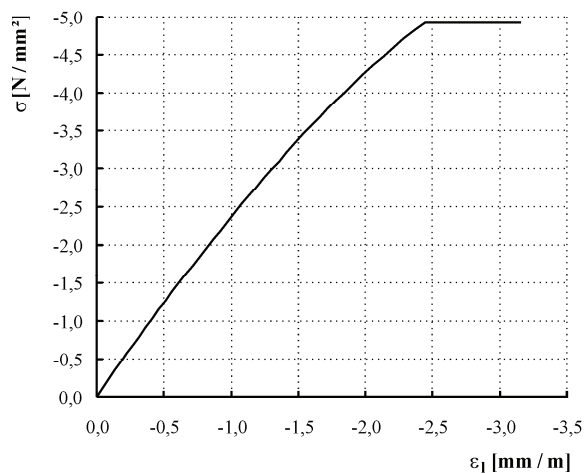
überwiegend ruhende Belastung

Material: Porenbeton P4.4

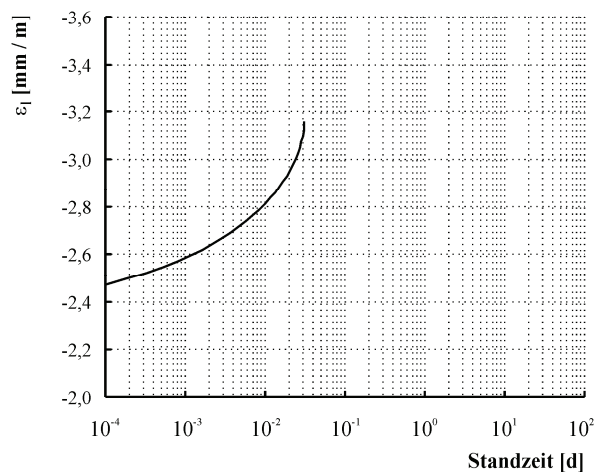
Belastungsgeschwindigkeit: 0,015 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,898 f_{cm}

ertragene Standzeit: 2667 s

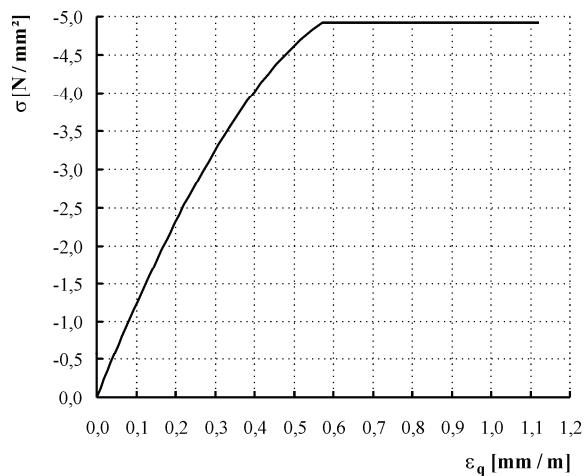
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



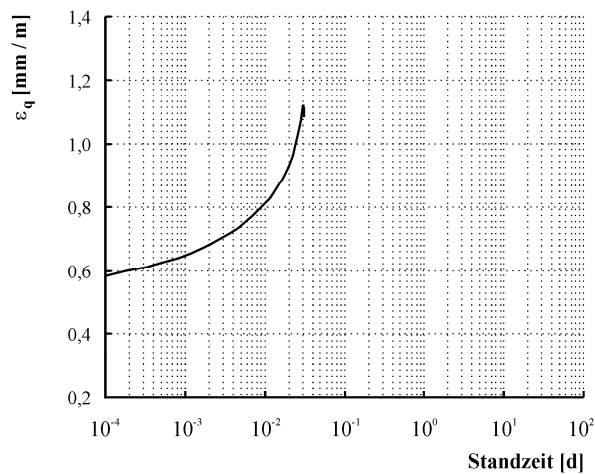
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



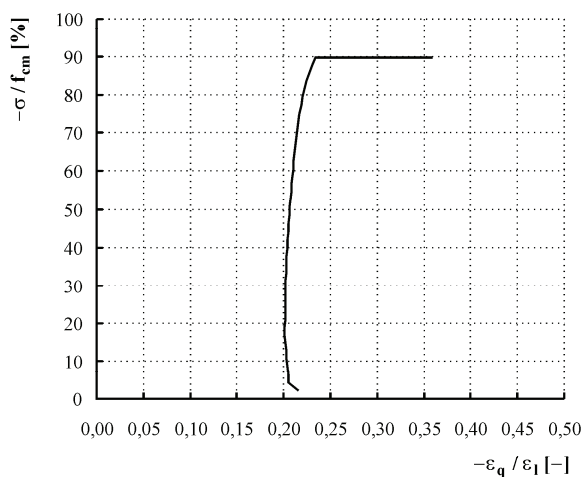
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



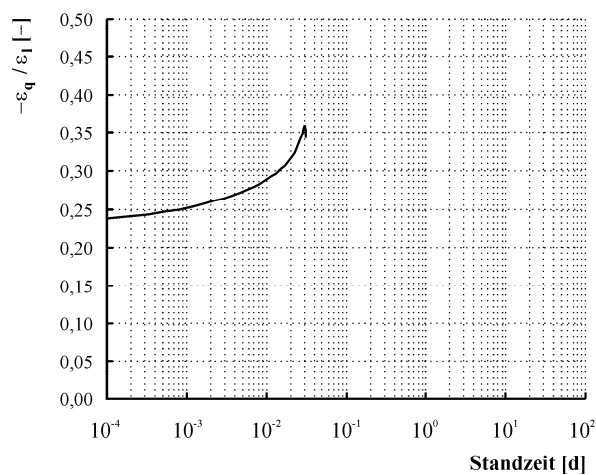
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B7: Probekörper Y 90-03 (Porenbeton P4.4)

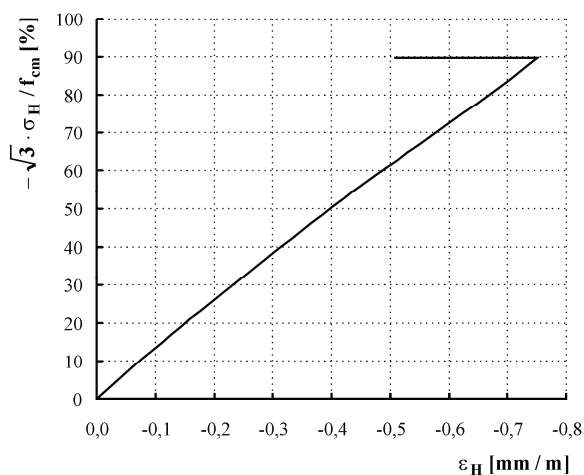
- Fortsetzung -



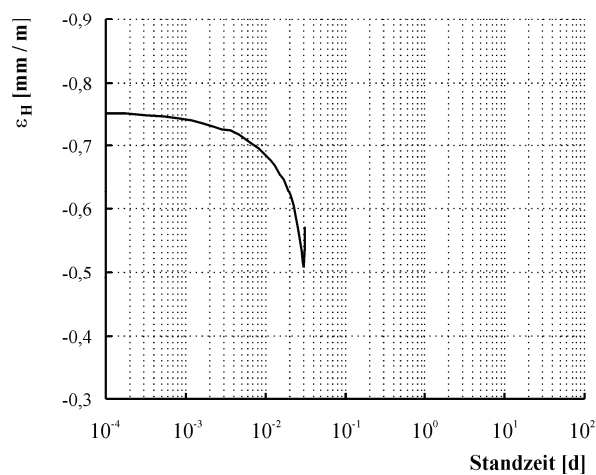
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



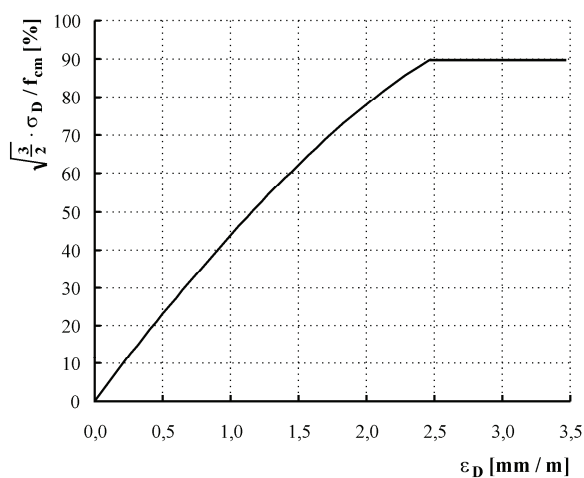
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



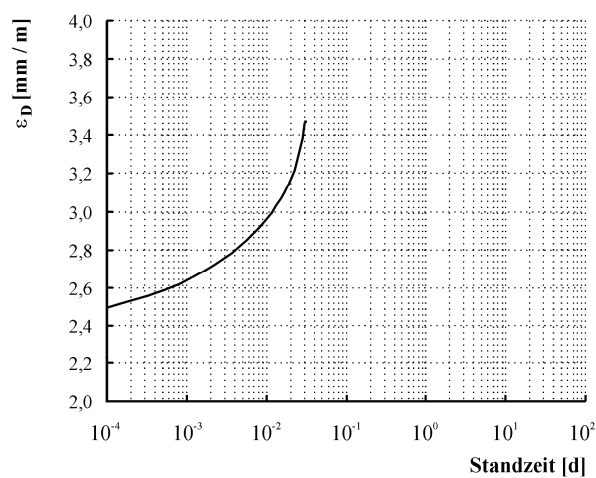
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

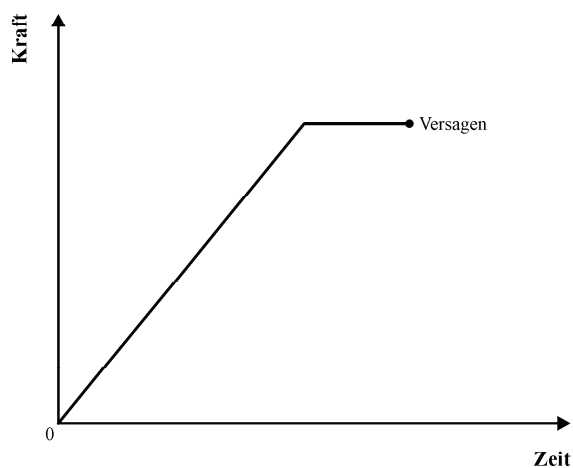


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B8: Probekörper Y 88-01 (Porenbeton P4.4)



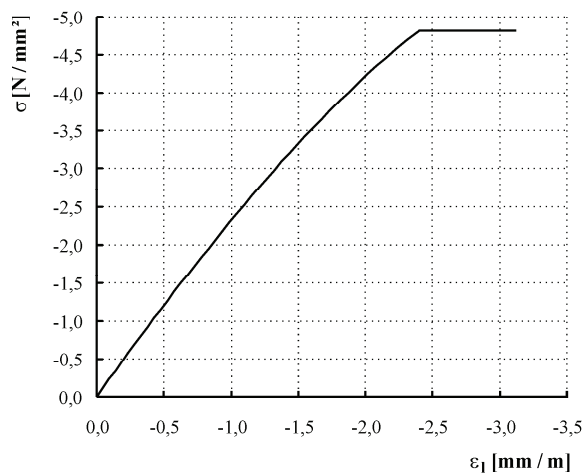
überwiegend ruhende Belastung

Material: Porenbeton P4.4

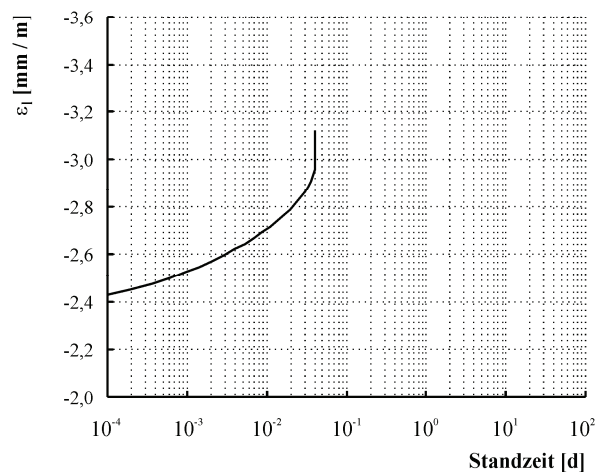
Belastungsgeschwindigkeit: 0,015 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,879 f_{cm}

ertragene Standzeit: 3434 s

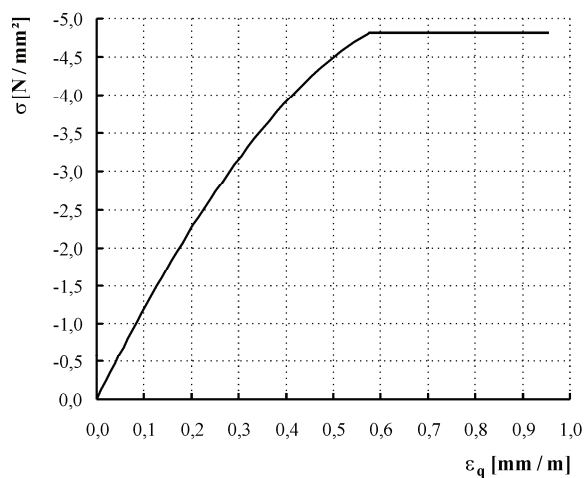
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



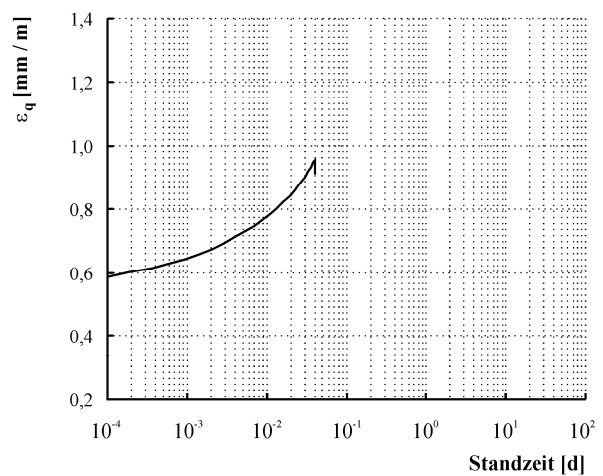
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



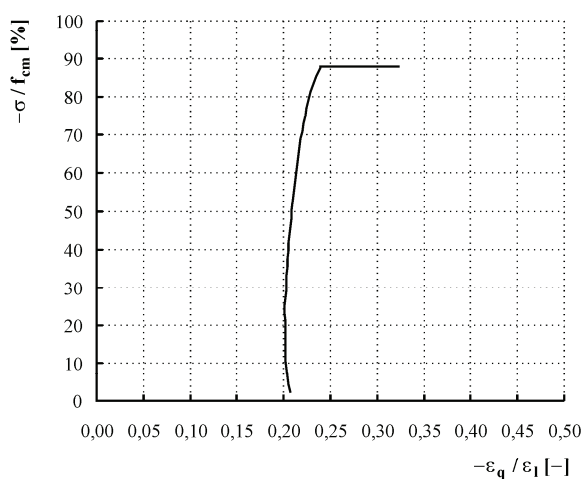
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



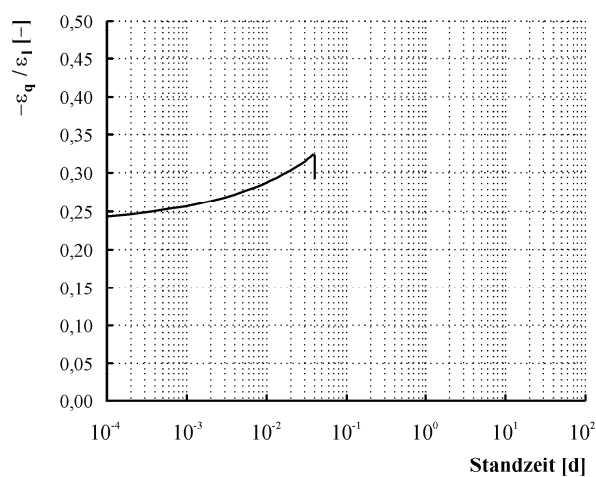
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B8: Probekörper Y 88-01 (Porenbeton P4.4)

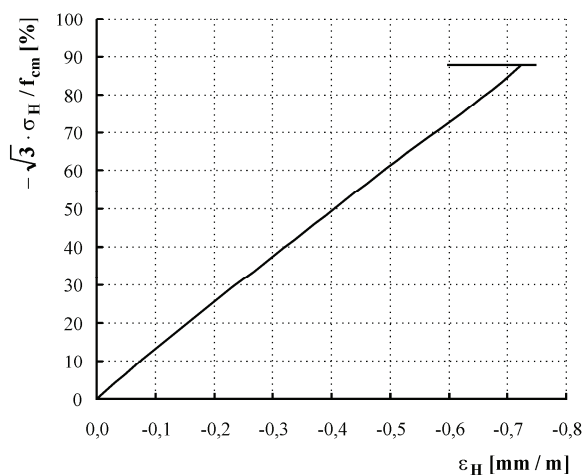
- Fortsetzung -



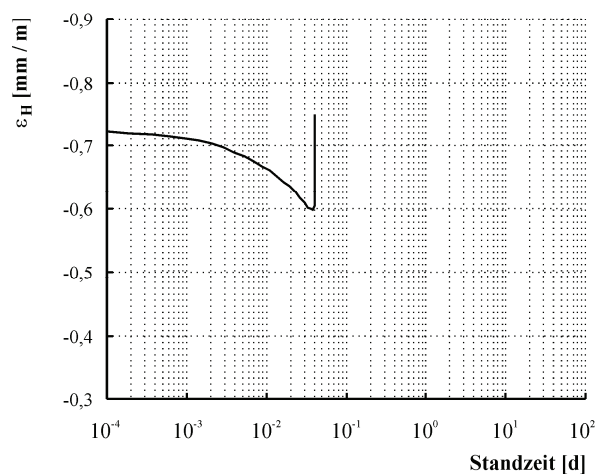
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



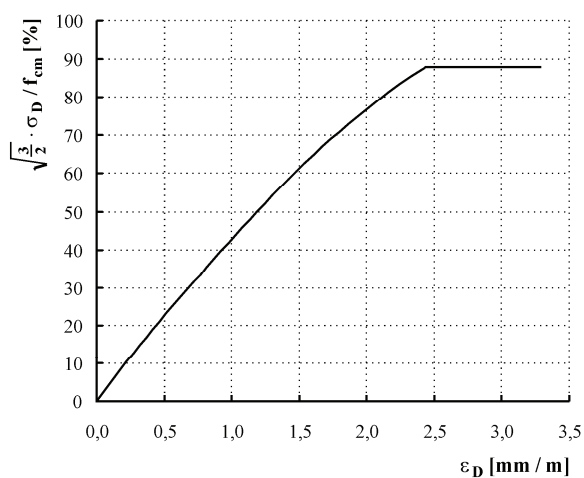
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



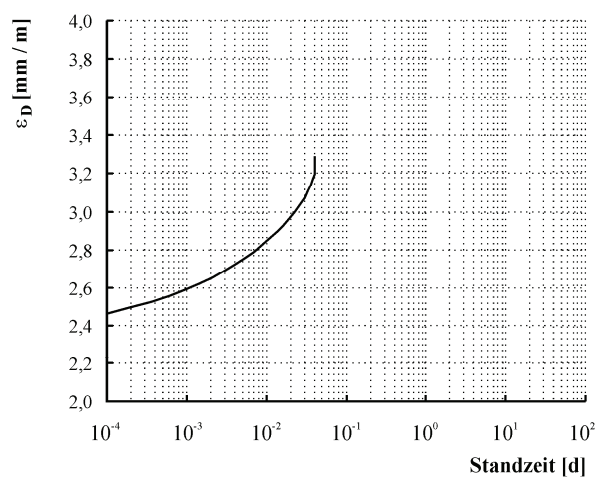
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

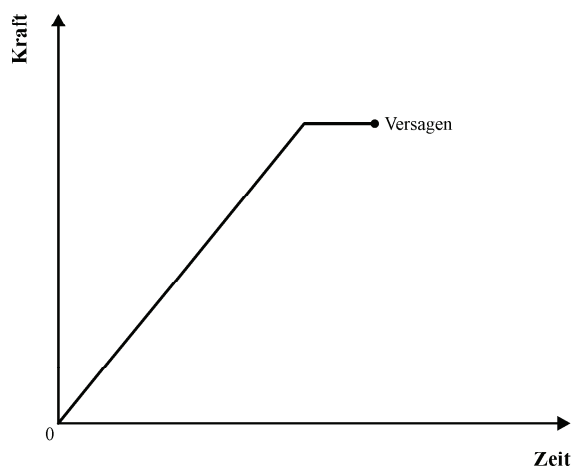


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B9: Probekörper Y 88-02 (Porenbeton P4.4)

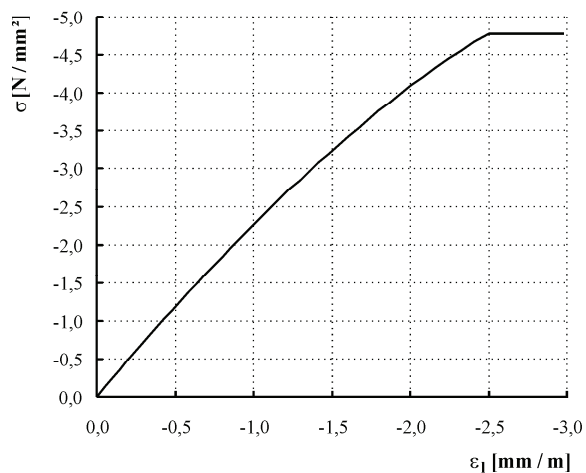
**überwiegend ruhende Belastung**

Material: Porenbeton P4.4

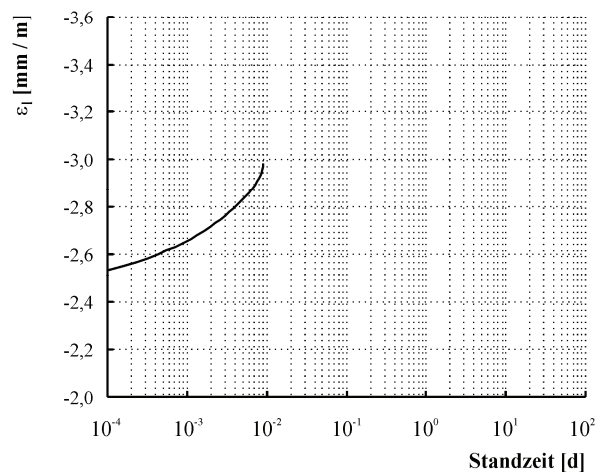
Belastungsgeschwindigkeit: 0,015 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,871 f_{cm}

ertragene Standzeit: 785 s

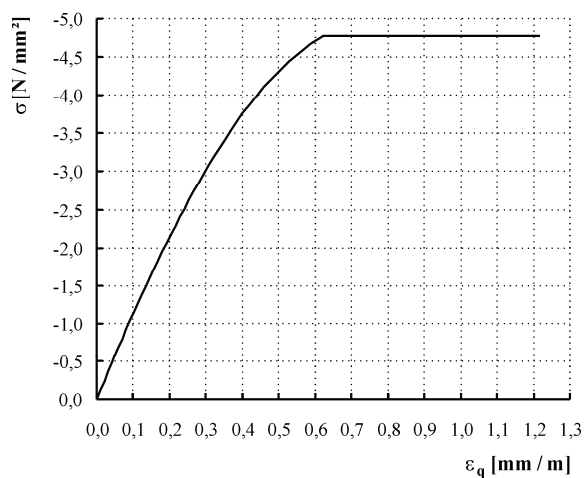
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



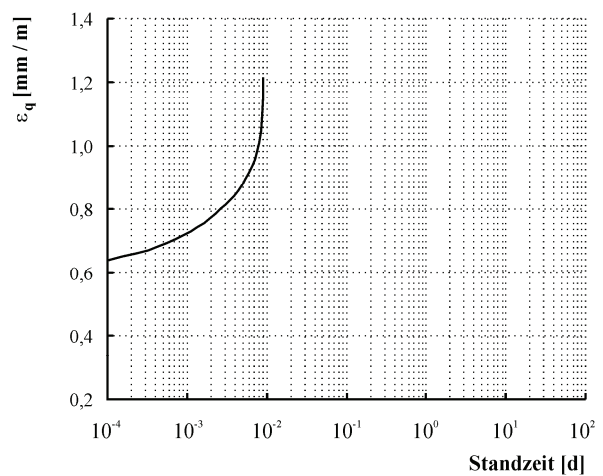
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



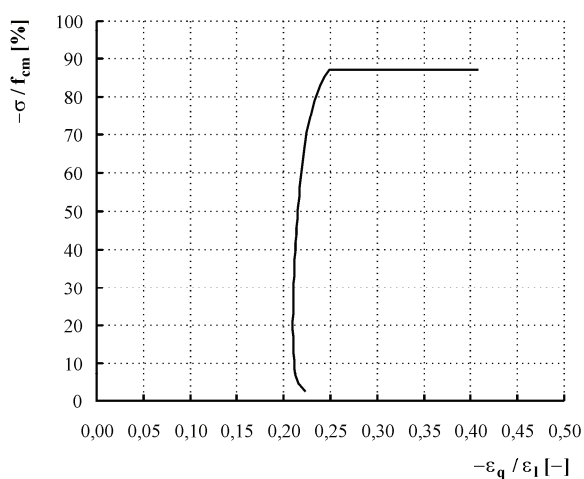
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



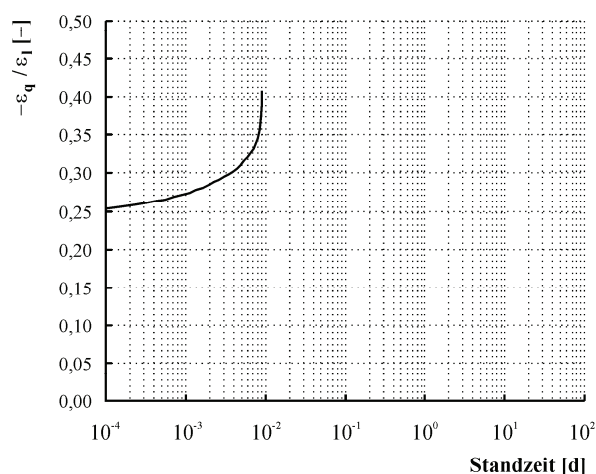
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B9: Probekörper Y 88-02 (Porenbeton P4.4)

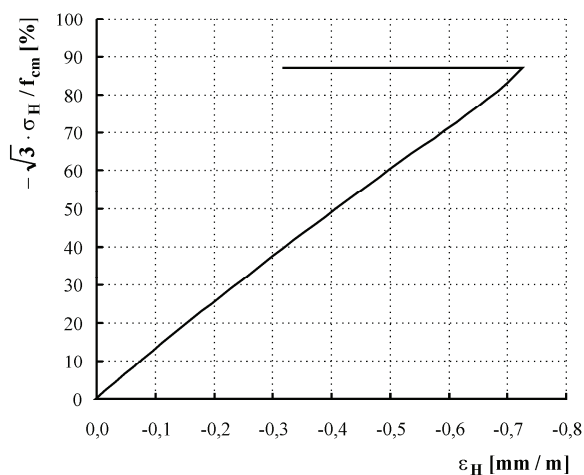
- Fortsetzung -



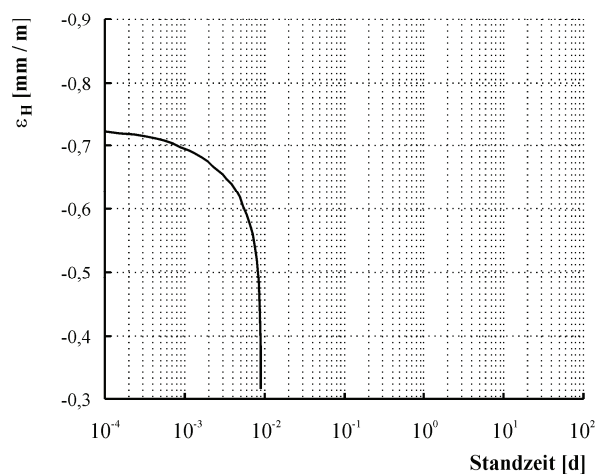
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



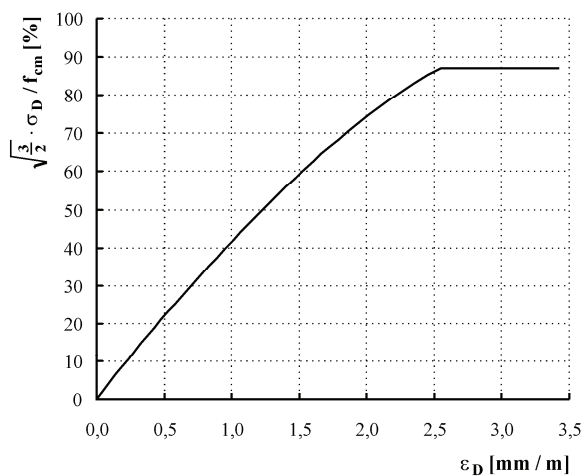
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



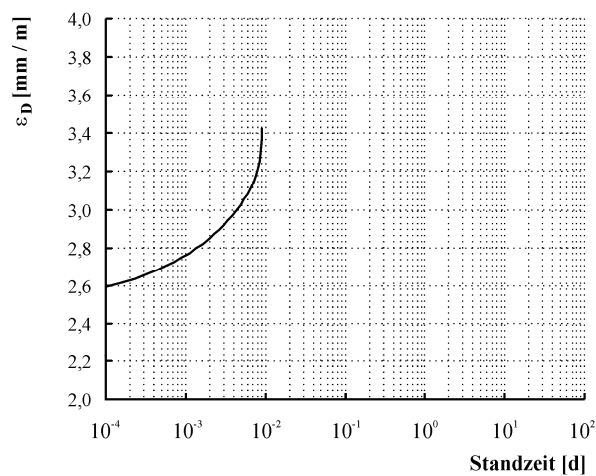
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

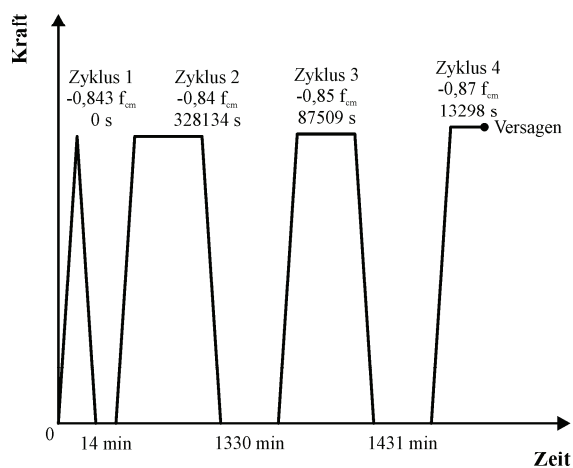


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B10: Probekörper Y 88-03 (Porenbeton P4.4)



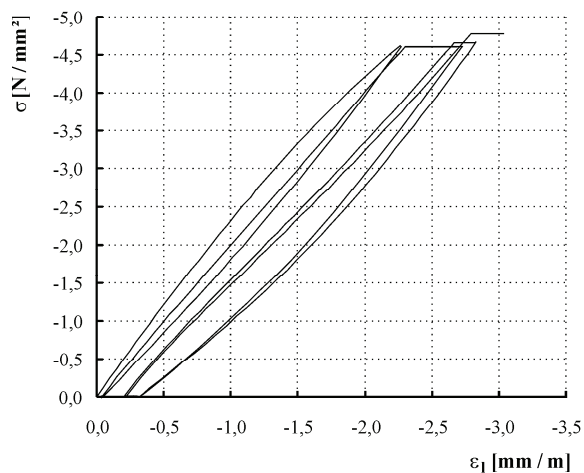
überwiegend ruhende Belastung, Zyklen

Material: Porenbeton P4.4

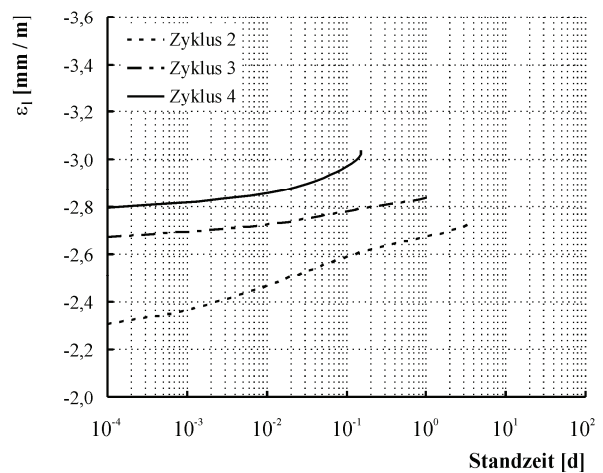
Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: 0,015 N/mm²/sBeanspruchungsintensitäten: 0,843 f_{cm} , 0,84 f_{cm} , 0,85 f_{cm} , 0,87 f_{cm}

Standzeiten: 0 s, 328134 s, 87509 s, 13298 s

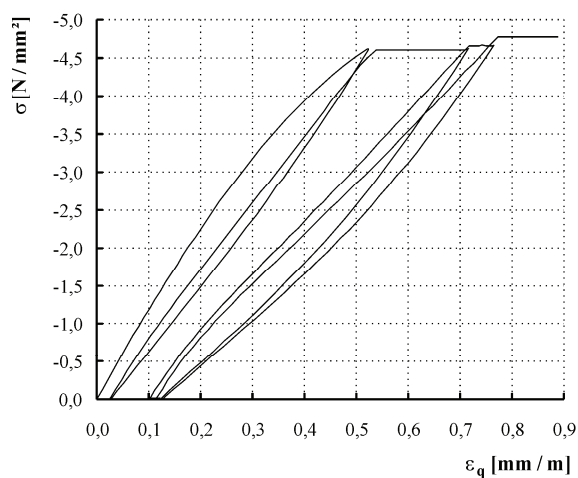
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



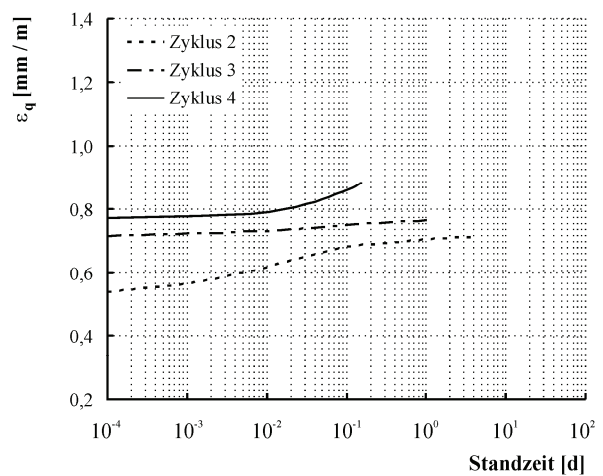
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



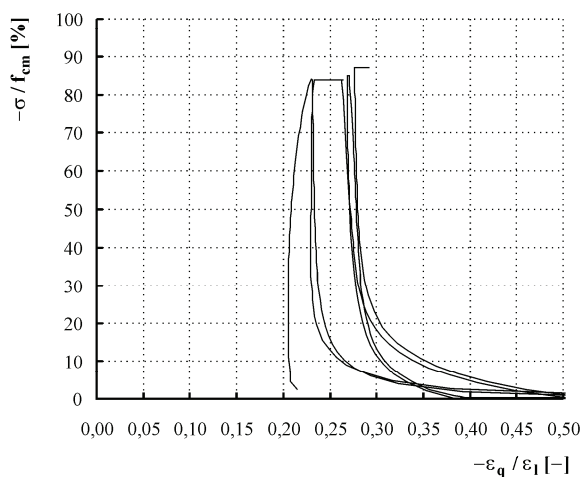
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



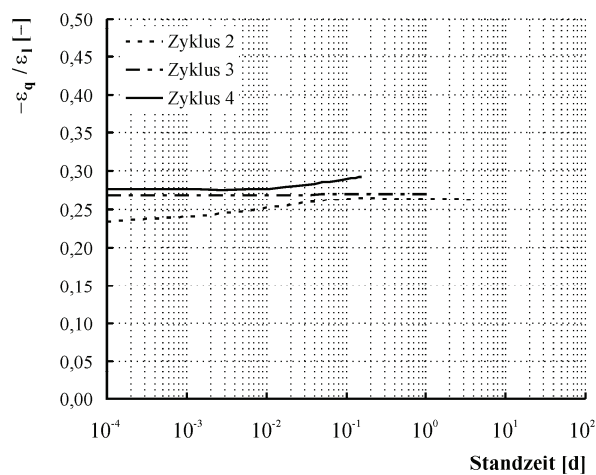
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B10: Probekörper Y 88-03 (Porenbeton P4.4)

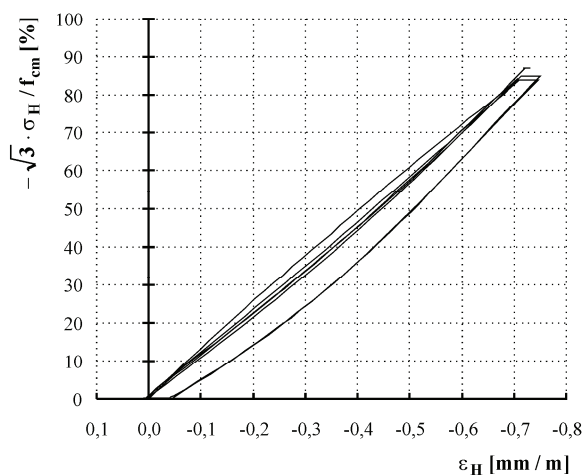
- Fortsetzung 1 -



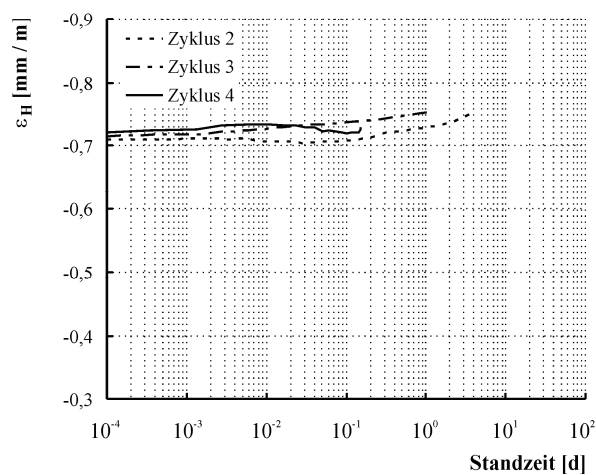
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



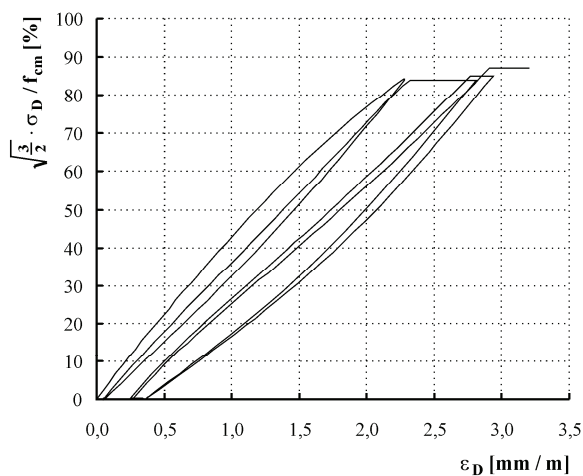
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



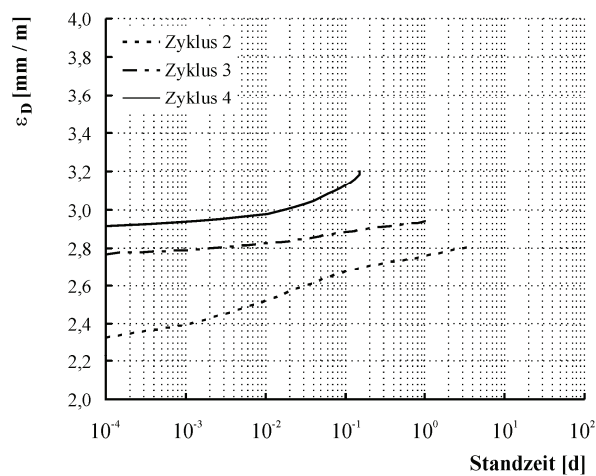
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



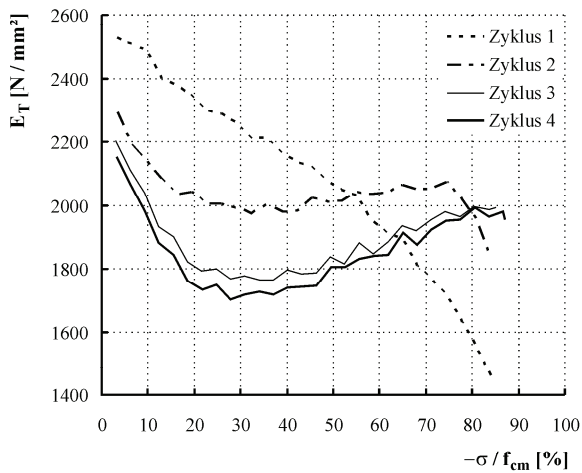
j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



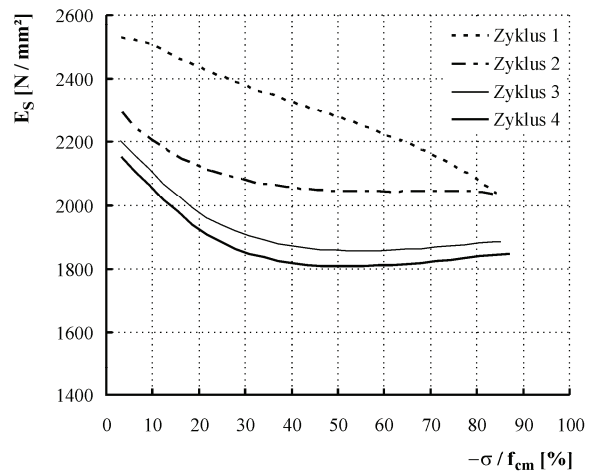
k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B10: Probekörper Y 88-03 (Porenbeton P4.4)

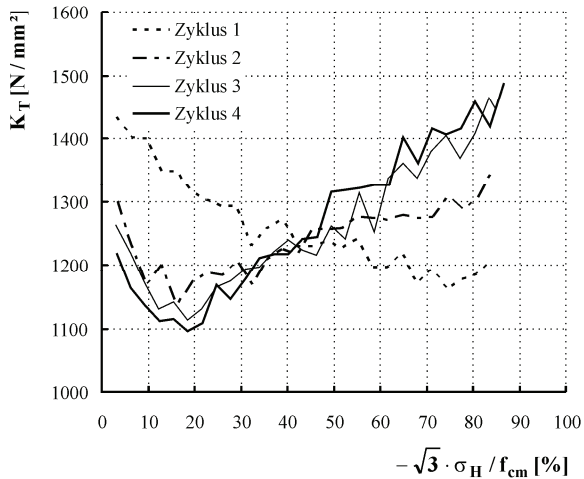
- Fortsetzung 2 -



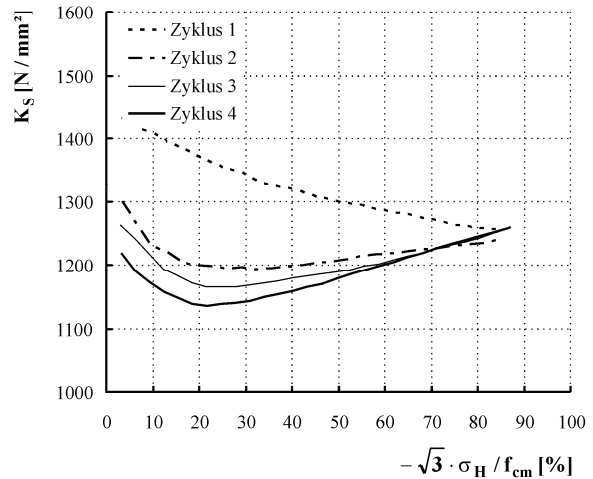
l) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



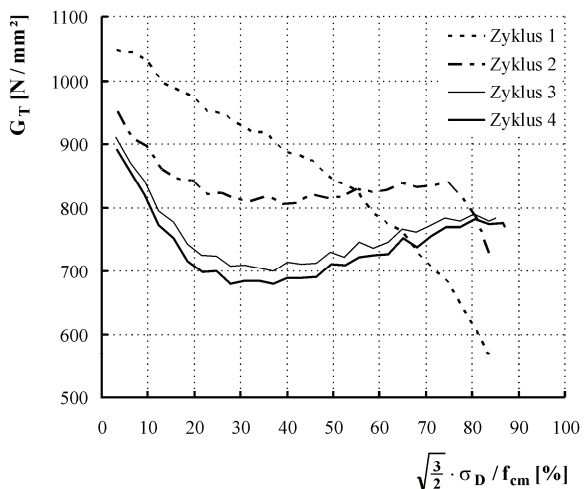
m) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)



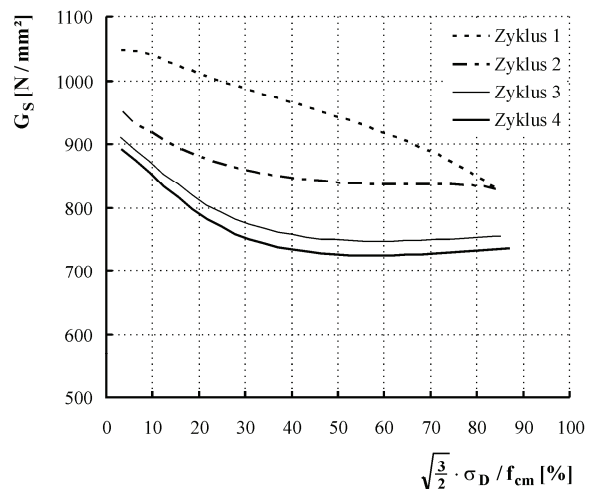
o) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



p) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

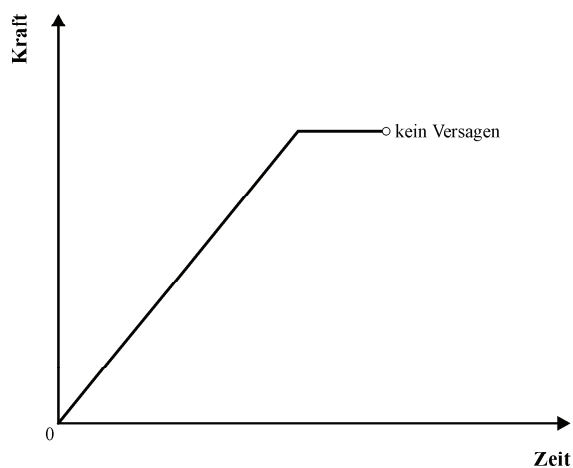


q) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



r) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

Tafel B11: Probekörper Y 86-02 (Porenbeton P4.4)



überwiegend ruhende Belastung

Material: Porenbeton P4.4

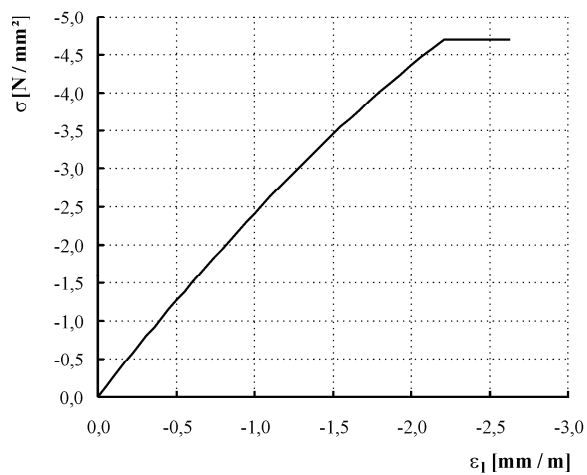
Belastungsgeschwindigkeit: 0,015 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,858 f_{cm}

ertragene Standzeit: 8212 s

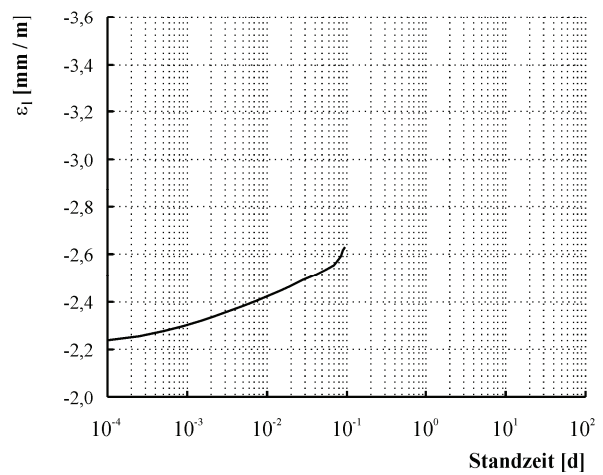
kein Versagen bei Versuchsende

Unregelmäßigkeiten bei Längs- und Querverformungen kurz vor Versuchsende

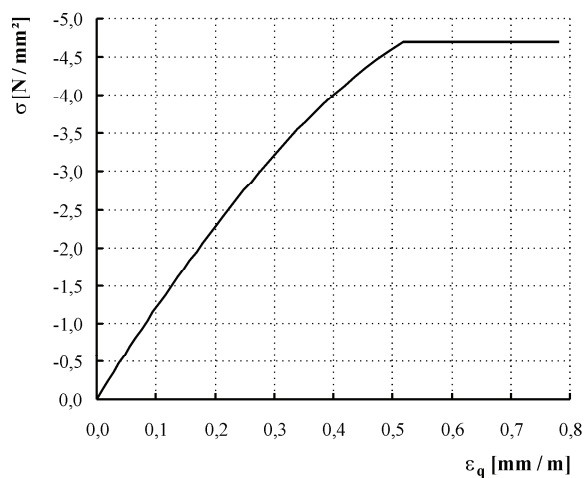
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



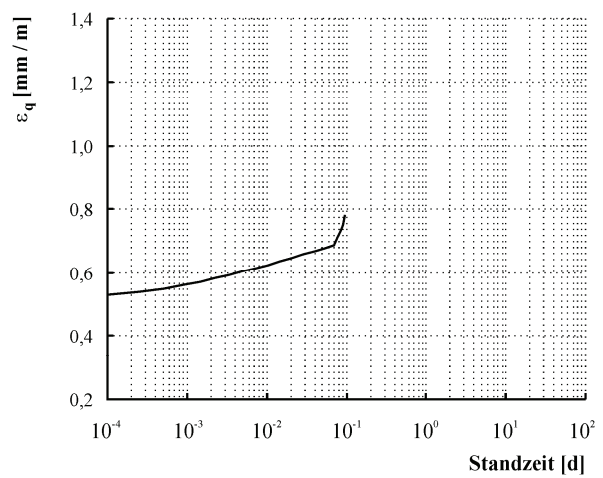
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



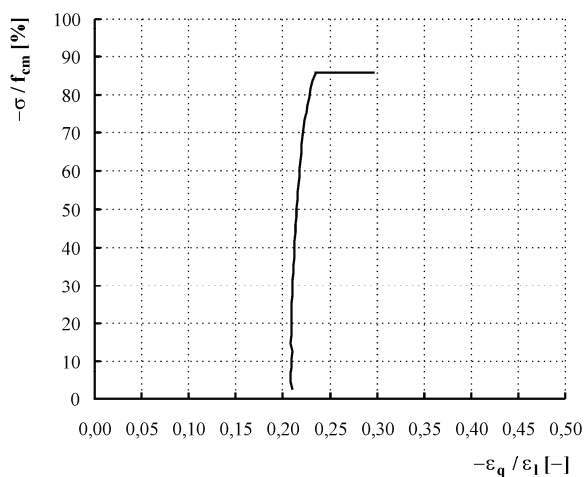
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



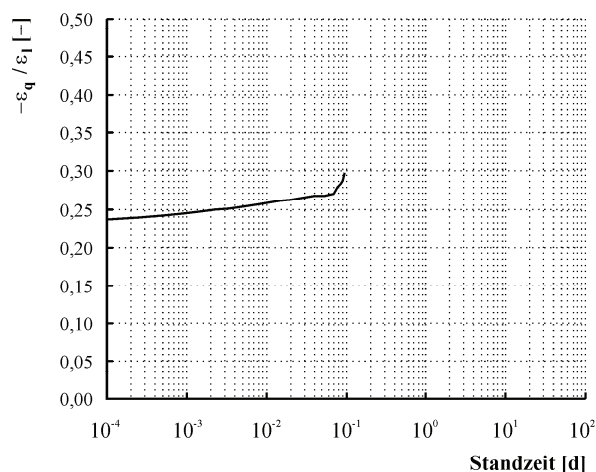
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B11: Probekörper Y 86-02 (Porenbeton P4.4)

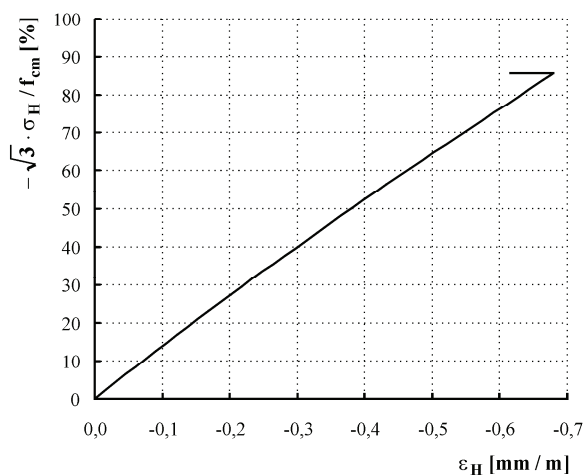
- Fortsetzung -



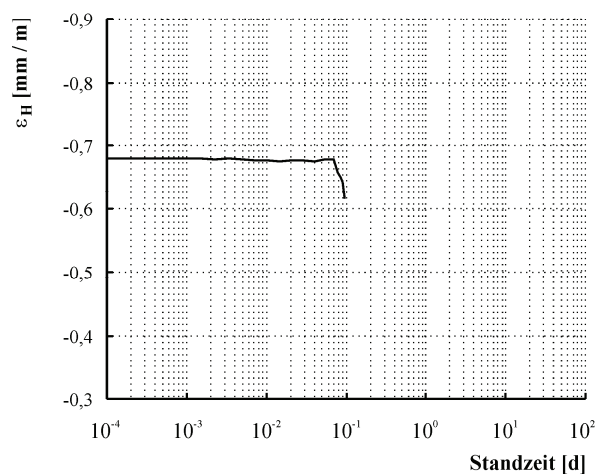
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



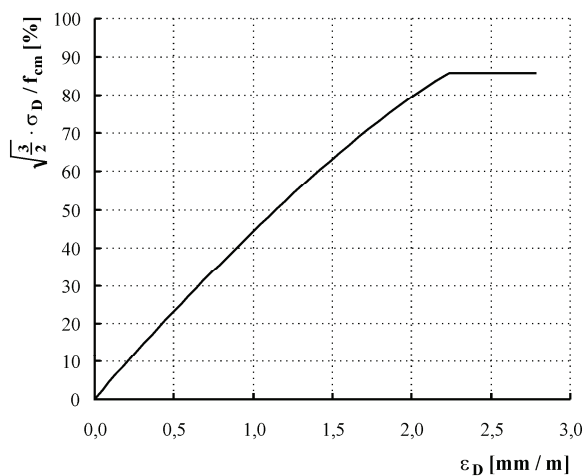
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



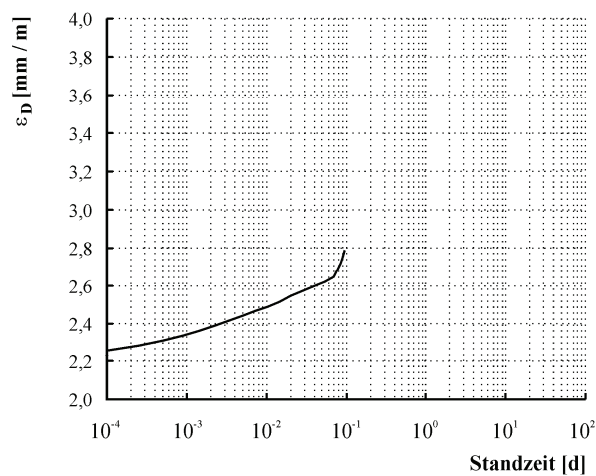
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

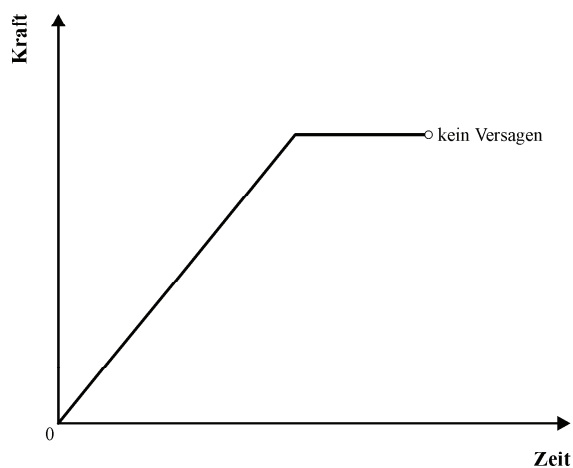


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B12: Probekörper Y 85-02 (Porenbeton P4.4)

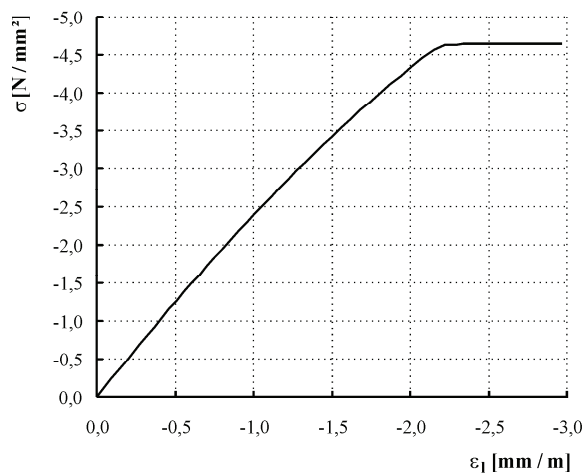
**überwiegend ruhende Belastung**

Material: Porenbeton P4.4

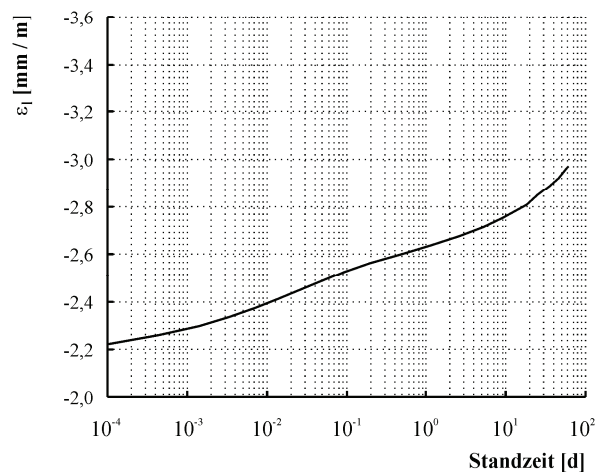
Belastungsgeschwindigkeit: 0,015 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,848 f_{cm}
ertragene Standzeit: 5366882 s

kein Versagen bei Versuchsende

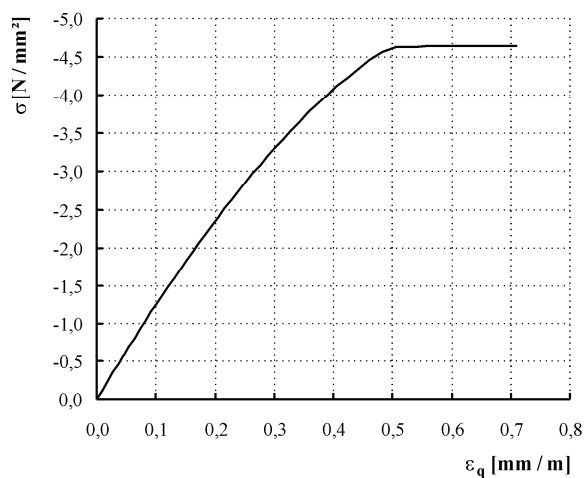
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



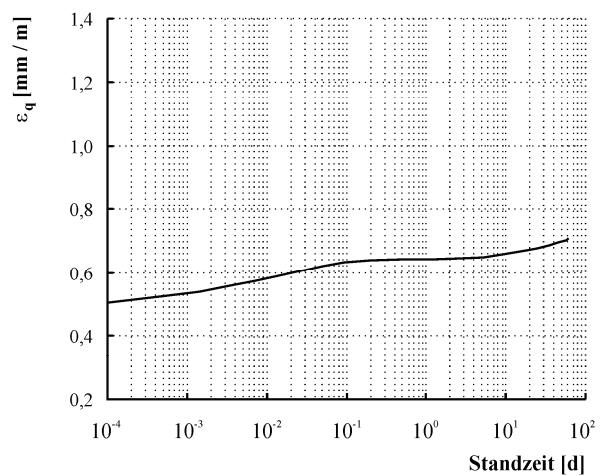
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



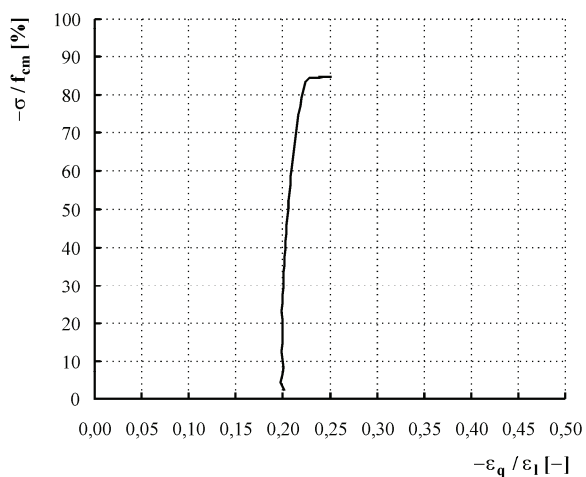
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



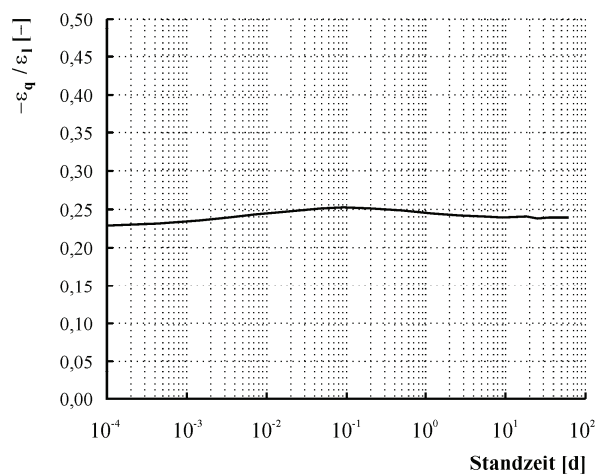
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel B12: Probekörper Y 85-02 (Porenbeton P4.4)

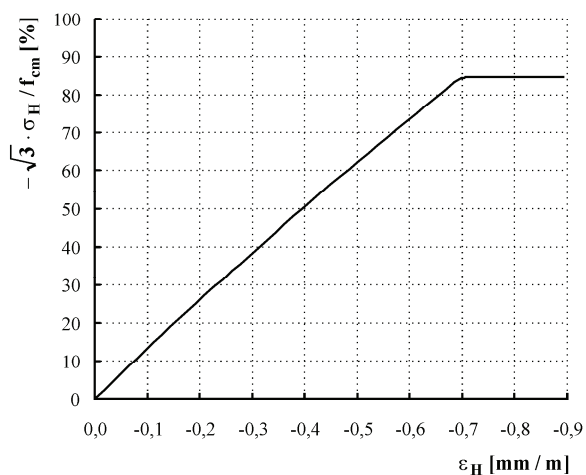
- Fortsetzung -



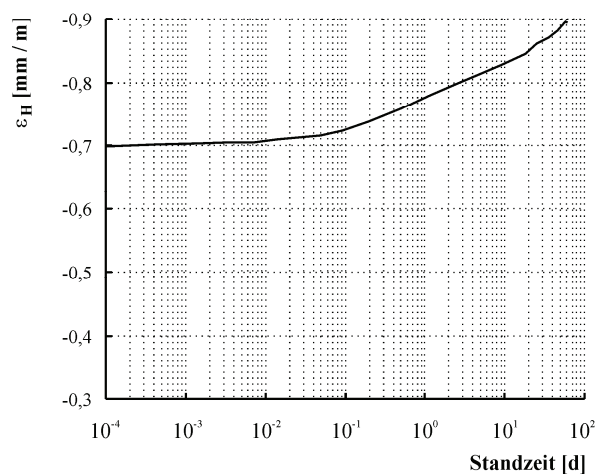
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



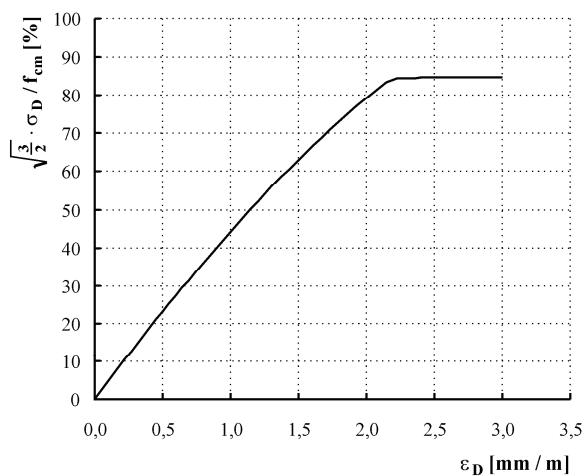
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



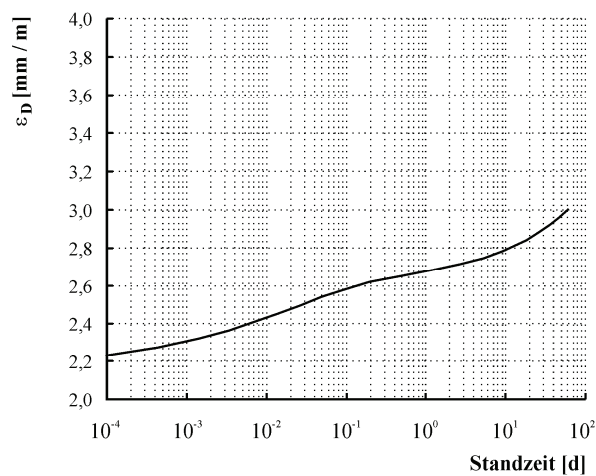
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Anhang C: Probekörper aus Porenbeton, Serie 3

Tab. C1: Versuchsergebnisse, Werte bei maximaler Druckkraft

Probe	Umfang	Beanspruchungs- geschwindigkeit	Kraft	Spannung	Beanspruchungs- intensität	Längs- dehnung	Quer- dehnung
[Kommentar]	u	σ / t	F	σ	$-\sigma / f_{cm}$	ϵ_l	ϵ_q
<i>kraftgeregelt</i>	[mm]	[N/mm ² /s]	[kN]	[N/mm ²]	[%]	[mm/m]	[mm/m]
300	472	0,01	-56,99	-3,21	102,8	-	-
301	471	0,01	-55,22	-3,13	100,0	-2,87	0,94
302	473	0,01	-56,21	-3,16	100,9	-	-
303	472	0,01	-55,40	-3,12	99,9	-	-
304	470	0,01	-54,39	-3,09	98,9	-	-
308	475	0,01	-54,72	-3,05	97,4	-2,90	1,00
305, Zyklus 4 [1, 2]	473	0,01	-56,01	-3,15	100,6	-3,00	0,93
317 [2]	476	1,00	-62,88	-3,49	111,5	-3,03	0,92

[1] vorbelastet

[2] nicht für Mittelwert (Kurzzeitdruckfestigkeit) herangezogen

Tab. C2: Versuchsergebnisse, Endwerte vor Versagen bzw. unmittelbar vor Entlastung

Probe	Umfang	Kraft	Spannung	Beanspruchungs- intensität	Längs- dehnung	Quer- dehnung	Haltezeit
[Kommentar]	u	F	σ	$-\sigma / f_{cm}$	ϵ_l	ϵ_q	t
	[mm]	[kN]	[N/mm ²]	[%]	[mm/m]	[mm/m]	[h:min:s]
<i>mit Versagen</i>							
309	473	-52,90	-2,97	95,0	-2,68	0,84	0:00:56
311	472	-49,89	-2,81	90,0	-2,64	0,82	0:34:43
312	473	-50,13	-2,82	90,0	-2,35	0,67	0:03:31
313 [1]	474	-49,20	-2,75	88,0	-2,01	0,93	0:02:36
315	470	-47,79	-2,72	86,9	-2,49	0,67	1:44:49
310	474	-47,51	-2,66	85,0	-2,42	0,69	0:09:08
307 [2]	471	-46,84	-2,65	84,8	-2,39	0,76	2:16:31
314, Laststufe 19 [3]	473	-53,02	-2,98	95,2	-2,77	0,86	0:00:09
306, Laststufe 12 [2, 3]	469	-50,89	-2,91	93,0	-2,76	1,06	0:00:59
316, Laststufe 15 [3]	472	-48,79	-2,75	88,0	-2,29	0,76	0:00:42
<i>ohne Versagen</i>							
305, Zyklus 1	473	-44,51	-2,50	79,9	-2,21	0,55	358:34:39
306, Laststufe 11 [3]	469	-49,30	-2,82	90,1	-2,50	0,82	0:10:00
314, Laststufe 18 [3]	473	-50,11	-2,81	90,0	-2,52	0,76	0:09:00
316, Laststufe 14 [3]	472	-47,69	-2,69	86,0	-2,48	0,73	0:09:00
305, Zyklus 3 [4]	473	-47,86	-2,69	85,9	-2,52	0,70	71:54:18
305, Zyklus 2 [4]	473	-47,31	-2,66	85,0	-2,37	0,63	5:29:05

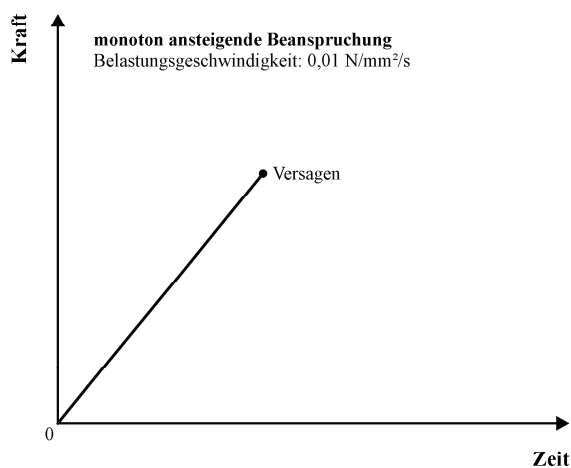
[1] Unregelmäßigkeiten bei Längs- und Querverformungen

[2] Ausfall eines Dehnungsmessstreifens (längs)

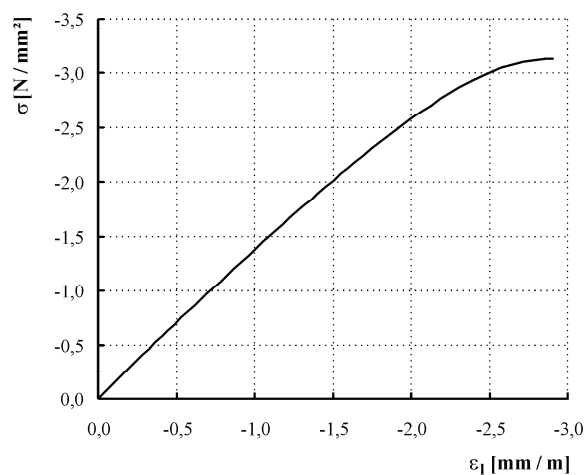
[3] zyklisch vorbelastet

[4] vorbelastet

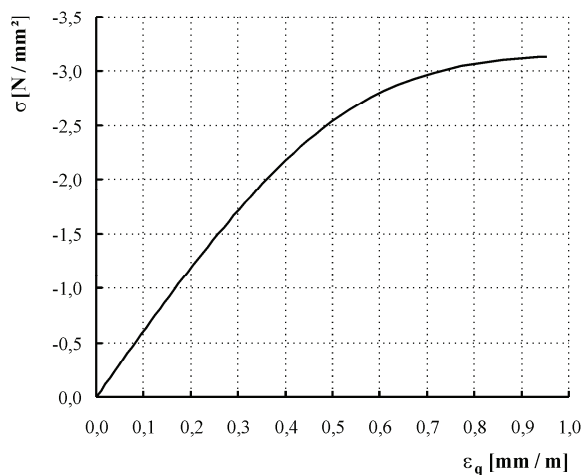
Tafel C1: Probekörper 301 (Porenbeton P2)



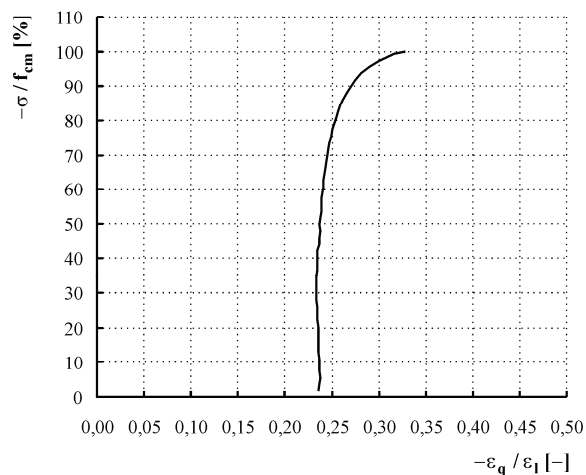
a) Belastungsregime, ergänzende Bemerkungen



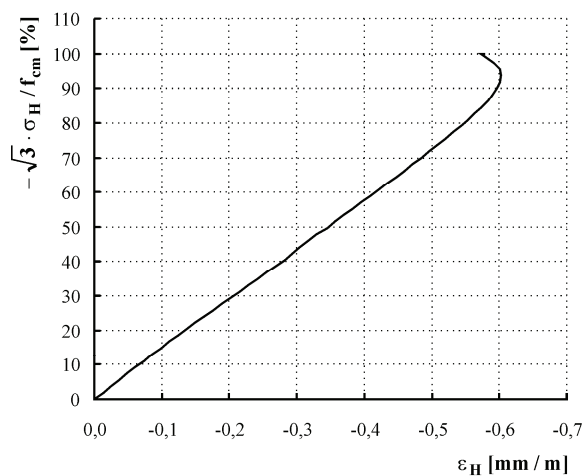
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



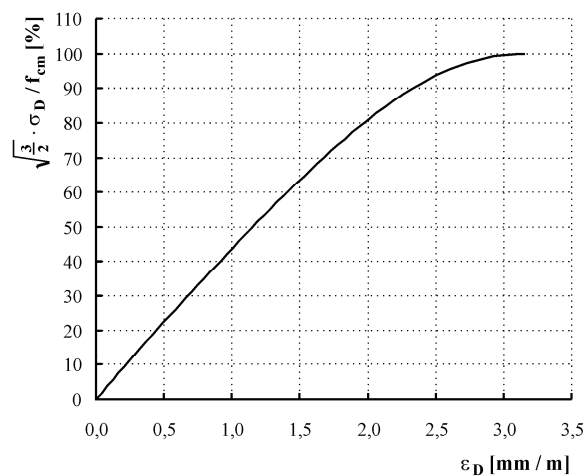
c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



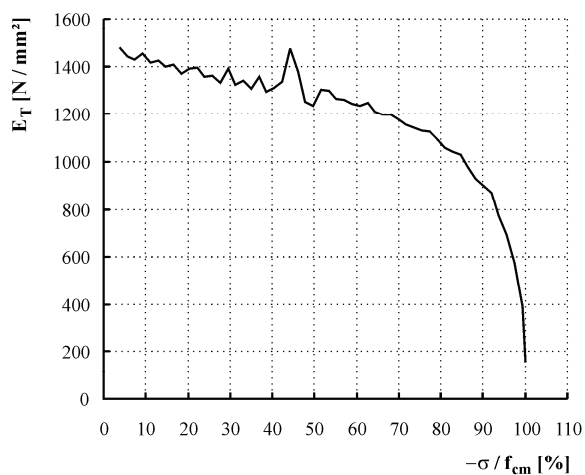
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



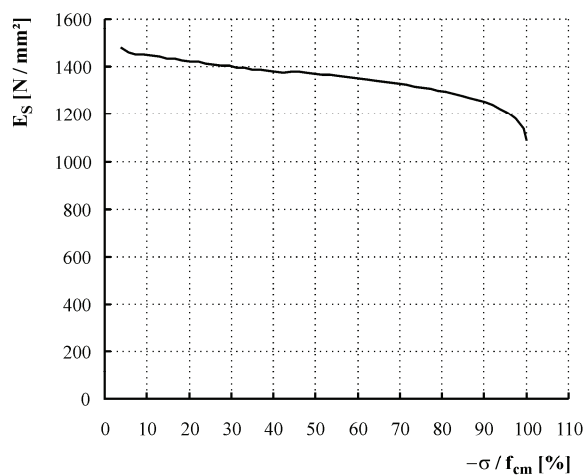
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel C1: Probekörper 301 (Porenbeton P2)

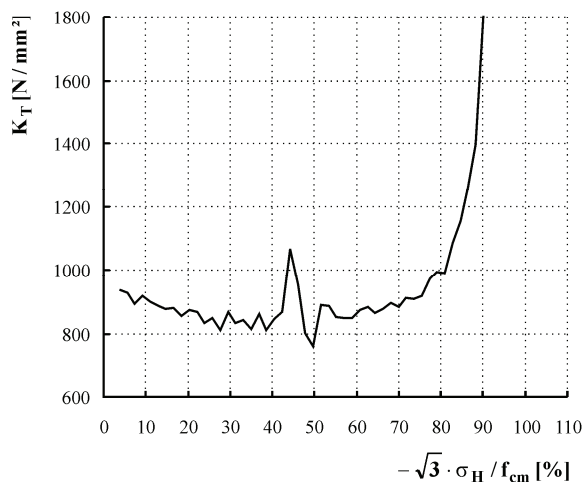
- Fortsetzung -



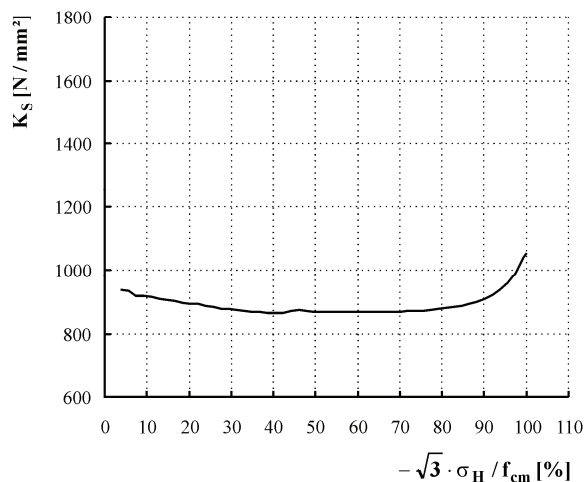
g) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



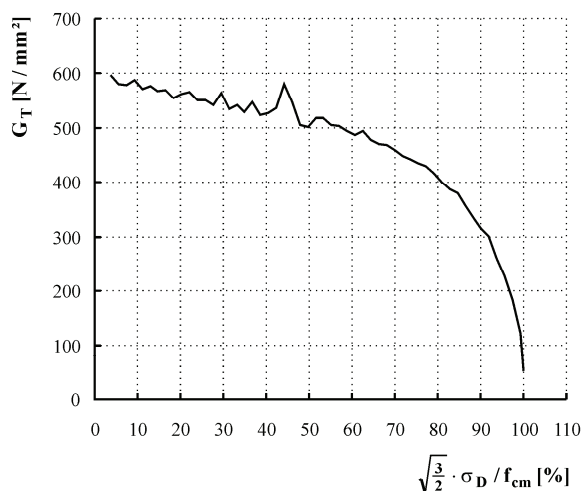
h) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)



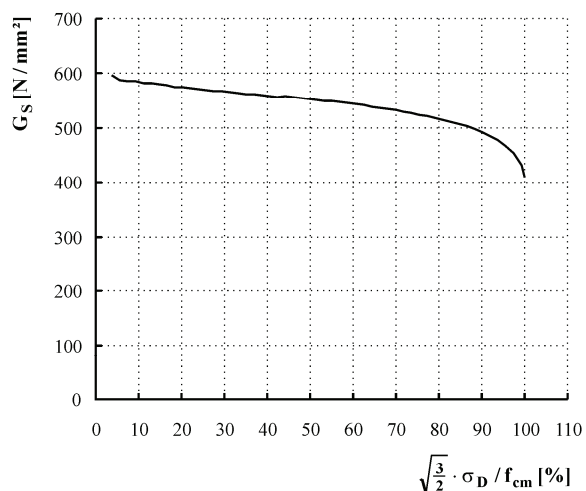
i) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



j) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

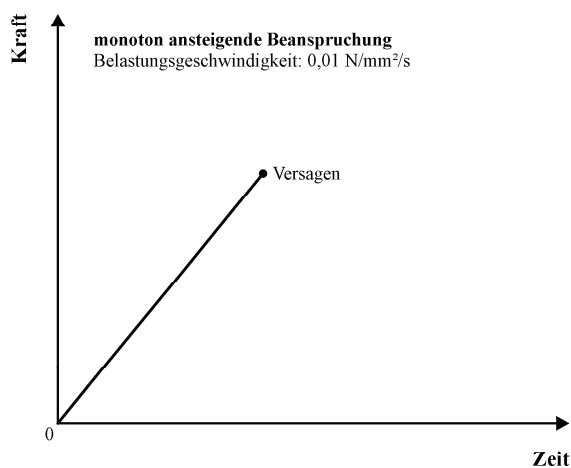


k) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)

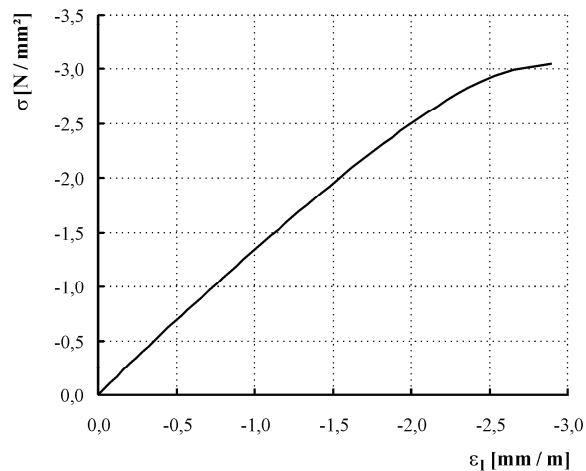


l) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

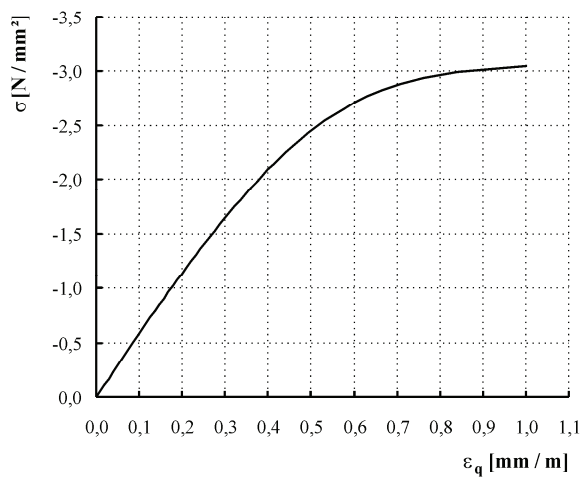
Tafel C2: Probekörper 308 (Porenbeton P2)



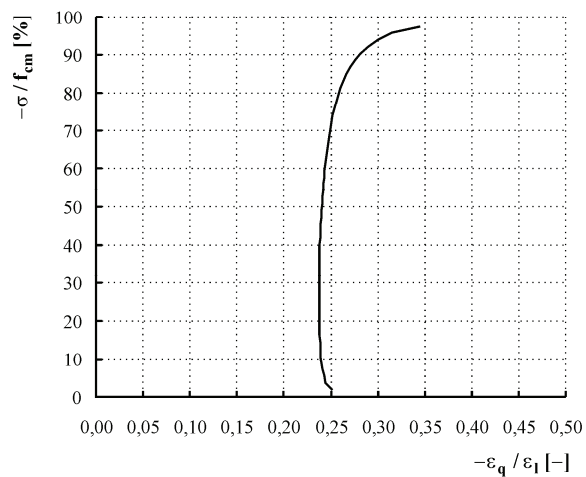
a) Belastungsregime, ergänzende Bemerkungen



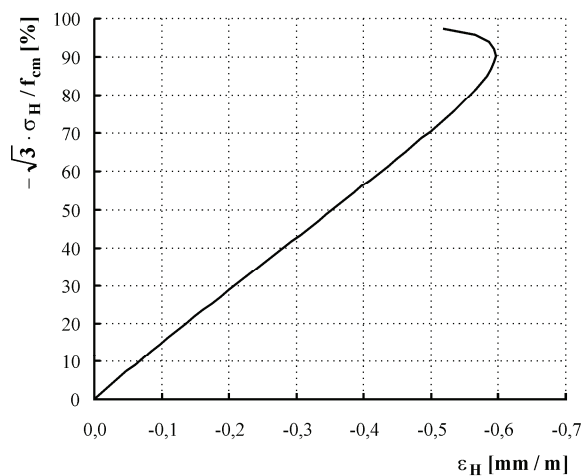
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



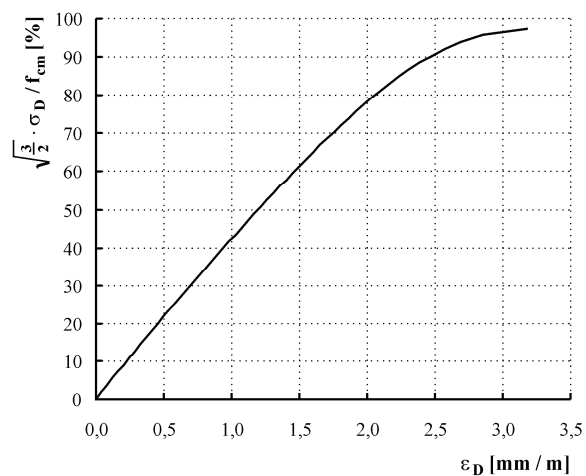
c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



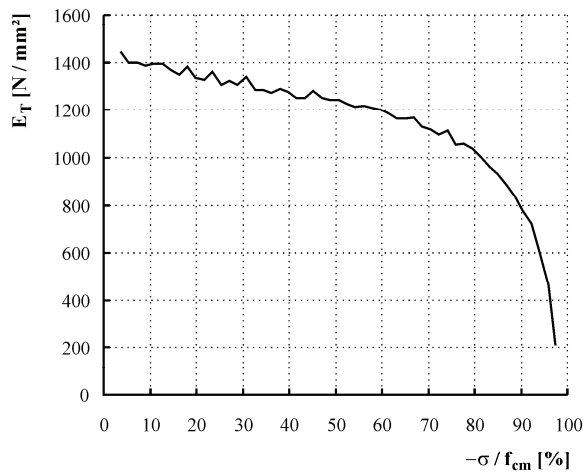
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



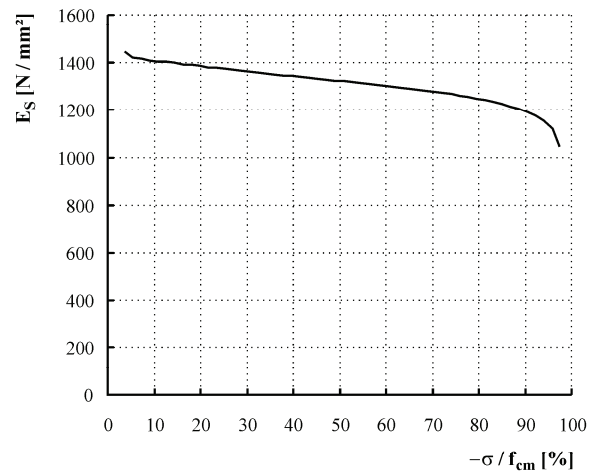
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel C2: Probekörper 308 (Porenbeton P2)

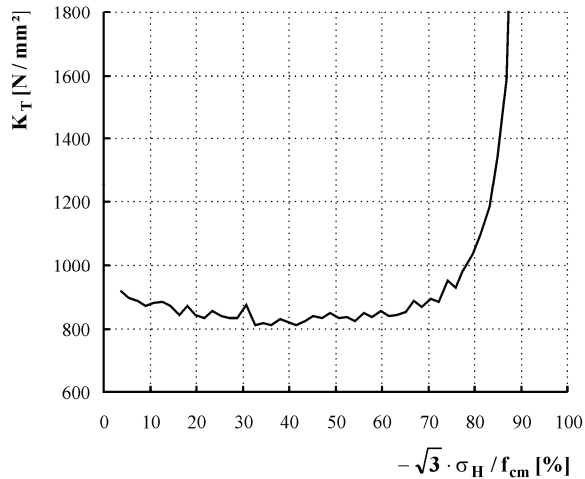
- Fortsetzung -



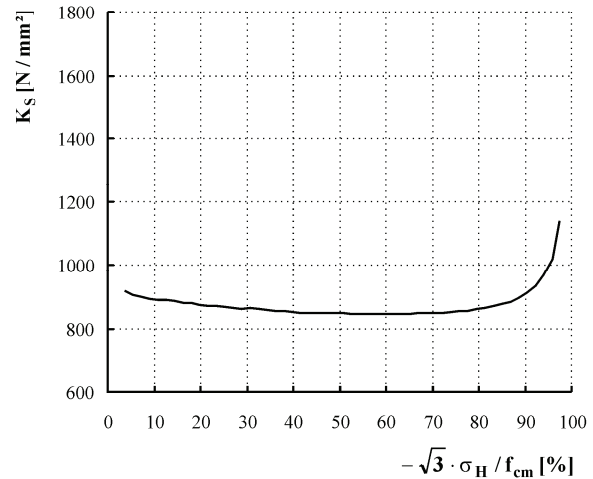
g) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



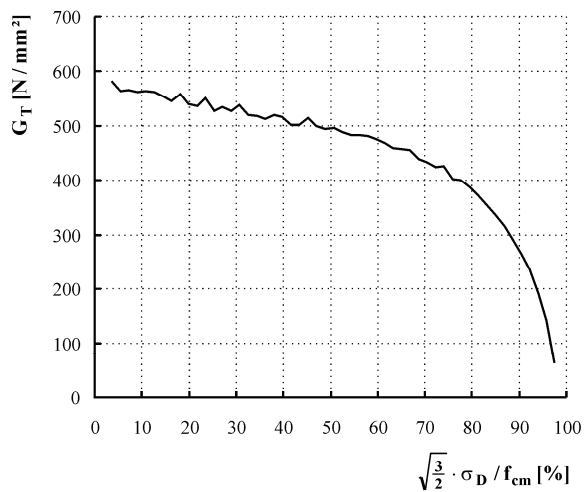
h) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)



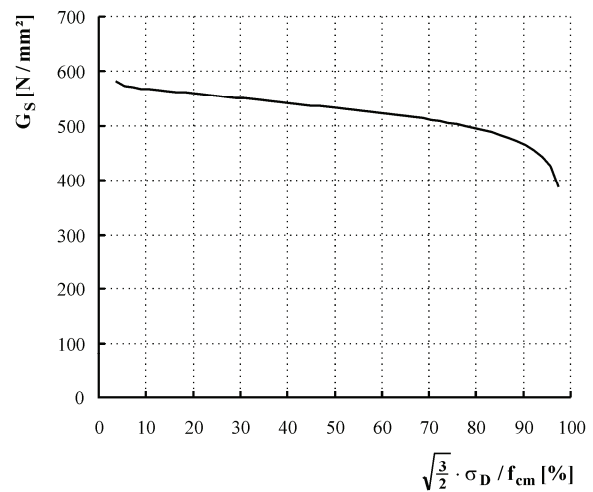
i) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



j) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

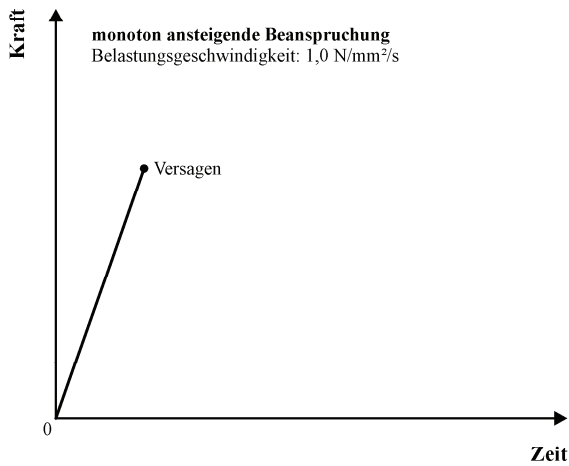


k) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)

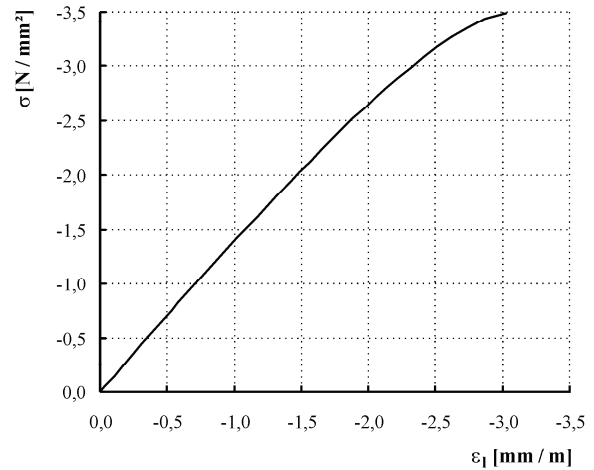


l) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

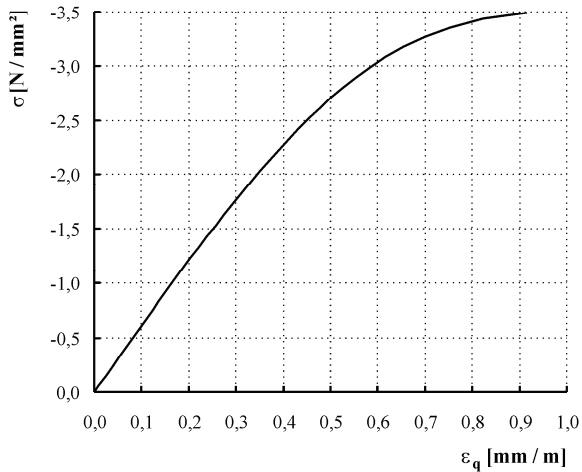
Tafel C3: Probekörper 317 (Porenbeton P2)



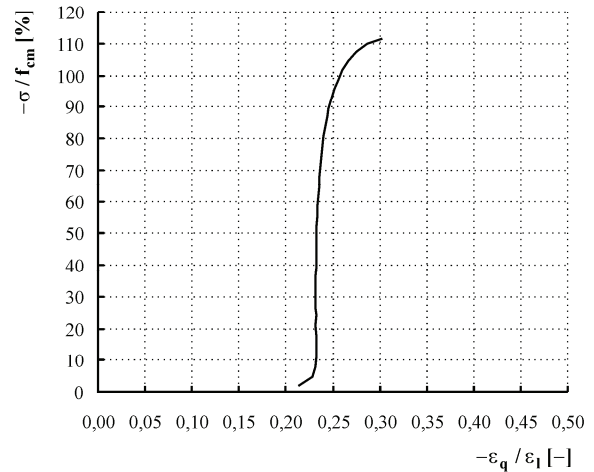
a) Belastungsregime, ergänzende Bemerkungen



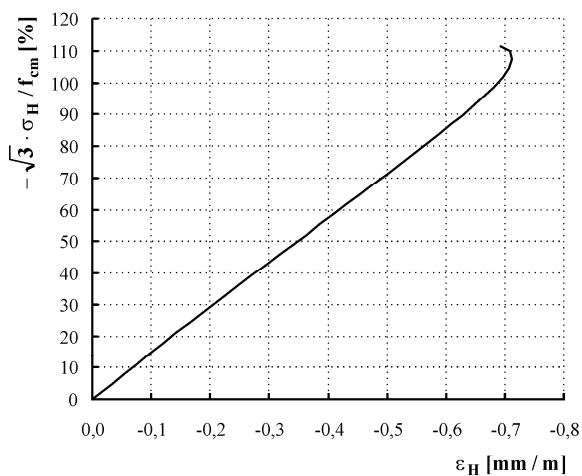
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



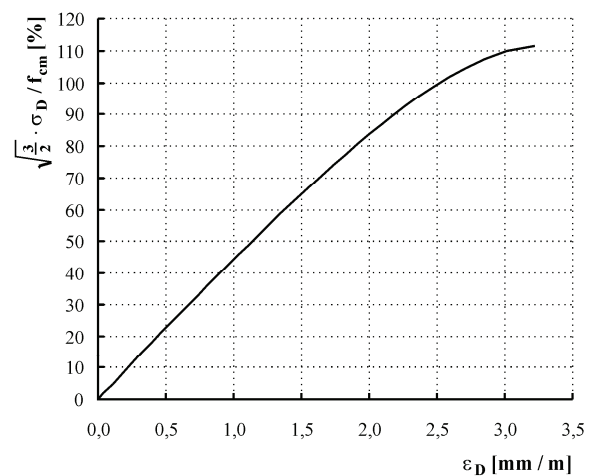
c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



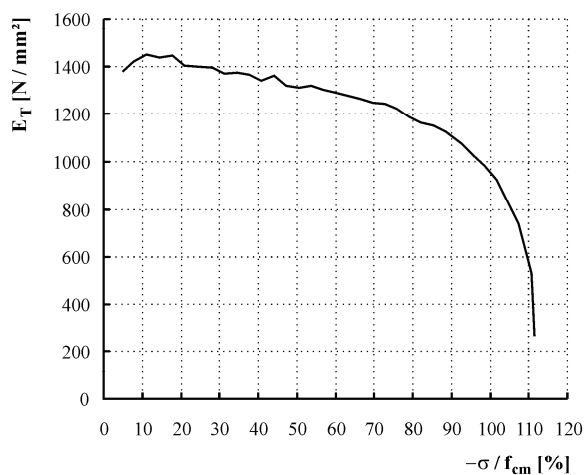
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



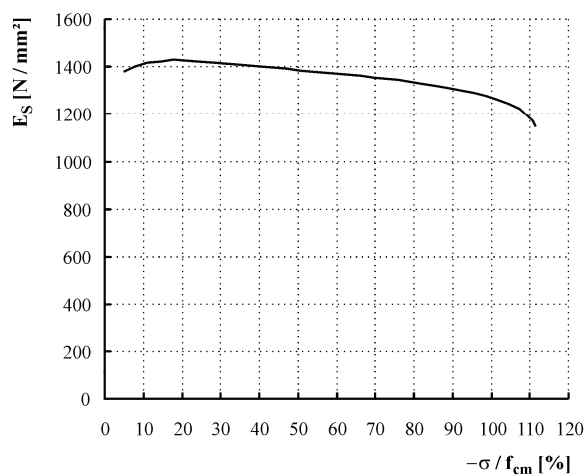
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel C3: Probekörper 317 (Porenbeton P2)

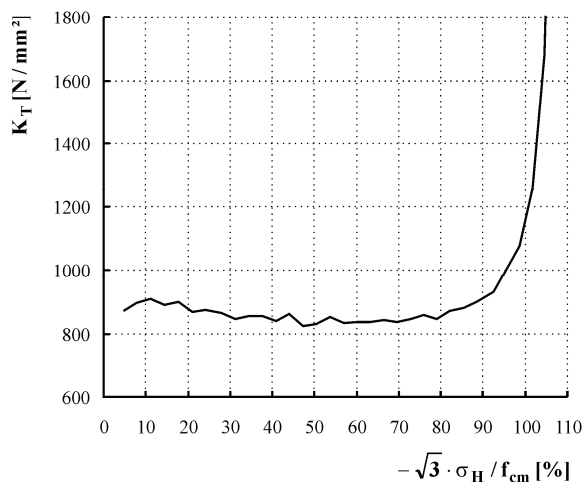
- Fortsetzung -



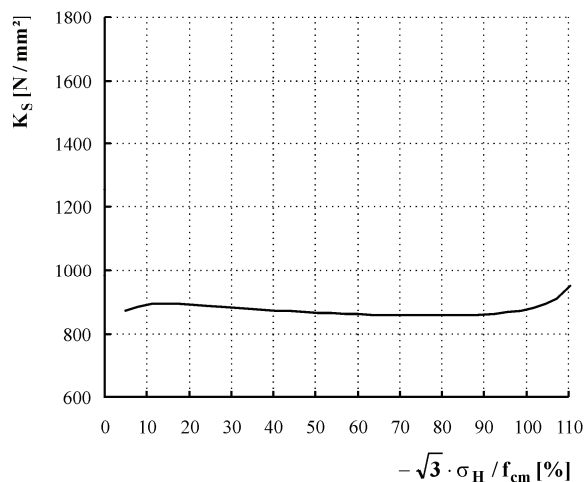
g) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



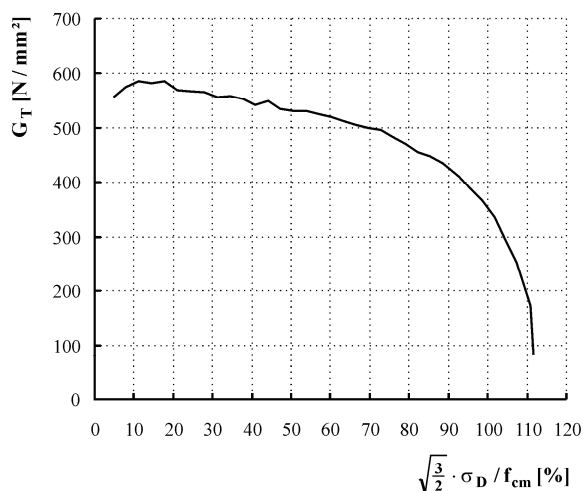
h) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)



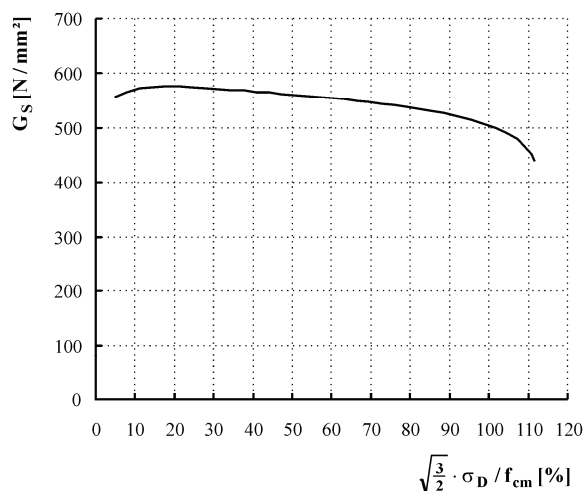
i) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



j) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

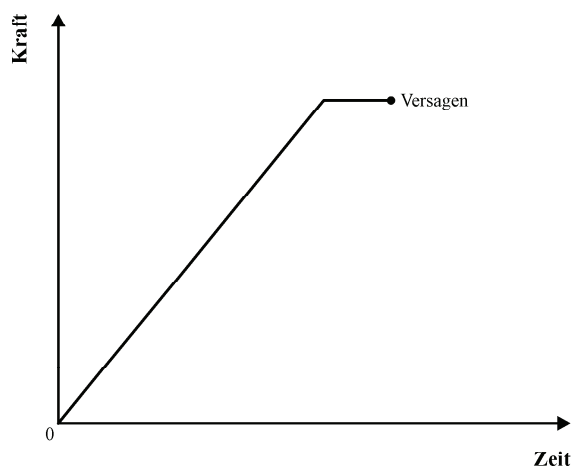


k) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



l) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

Tafel C4: Probekörper 309 (Porenbeton P2)

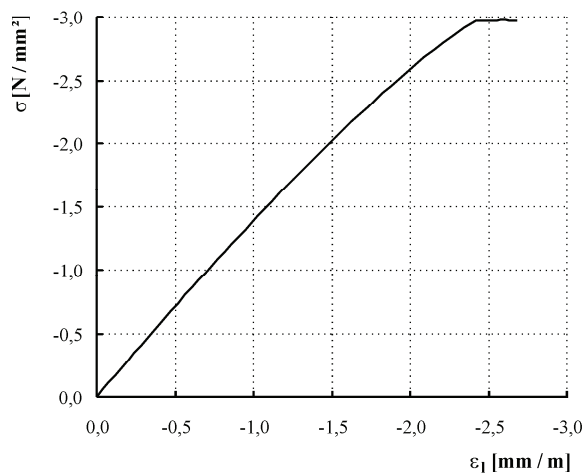
**überwiegend ruhende Belastung**

Material: Porenbeton P2

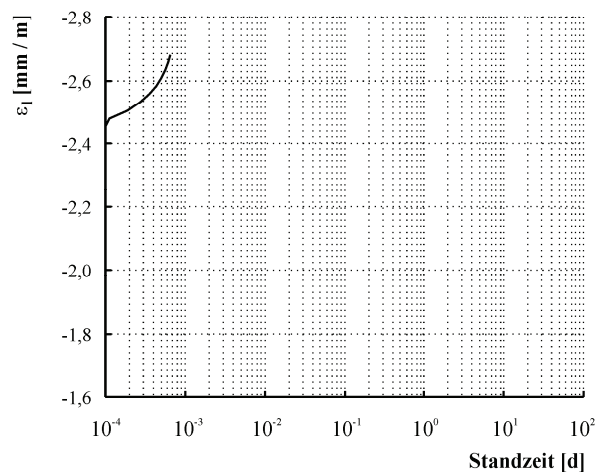
Belastungsgeschwindigkeit: 0,01 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,95 f_{cm}

ertragene Standzeit: 56 s

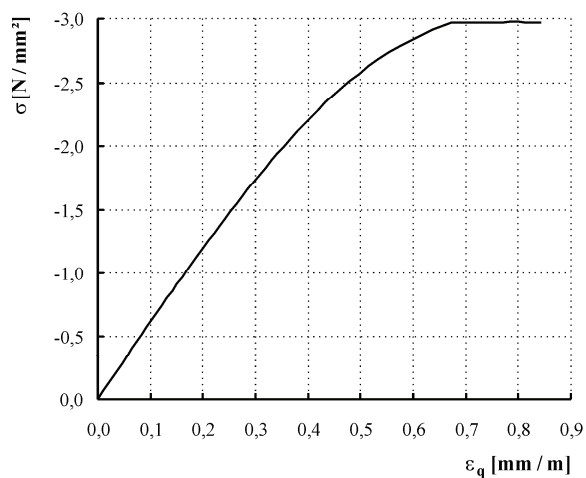
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



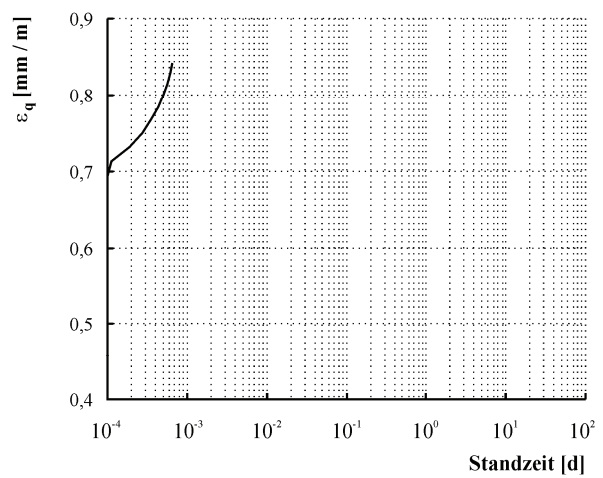
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



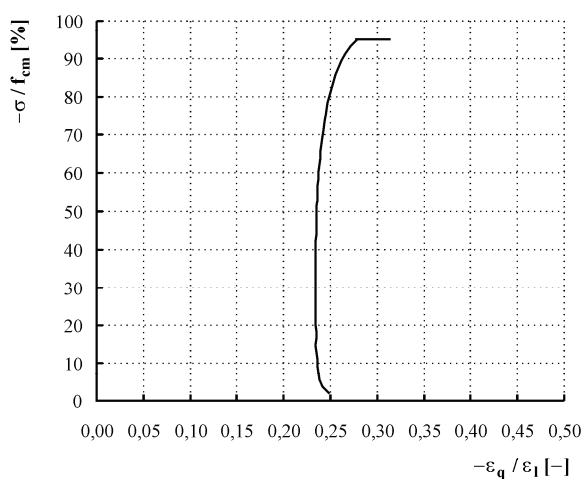
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



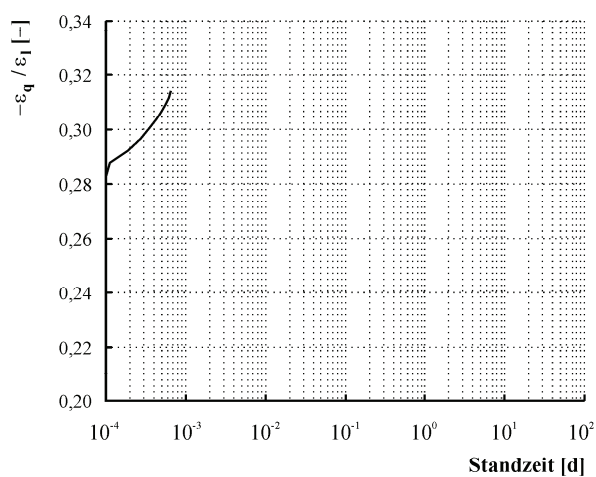
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C4: Probekörper 309 (Porenbeton P2)

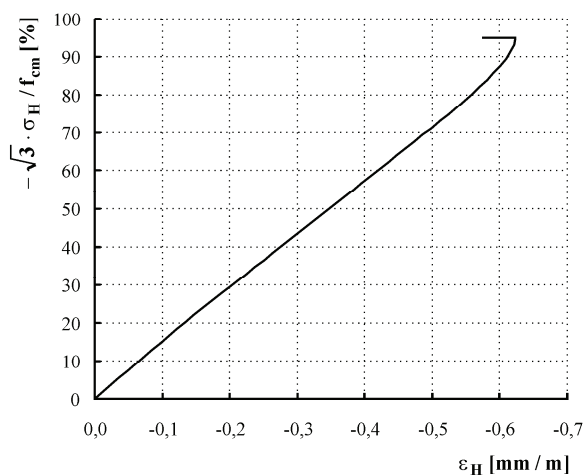
- Fortsetzung -



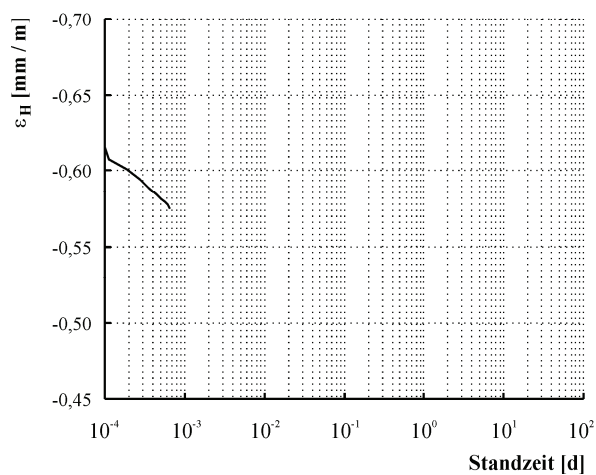
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



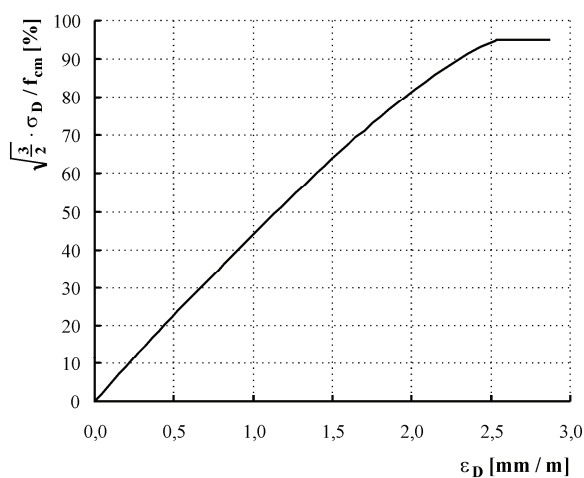
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



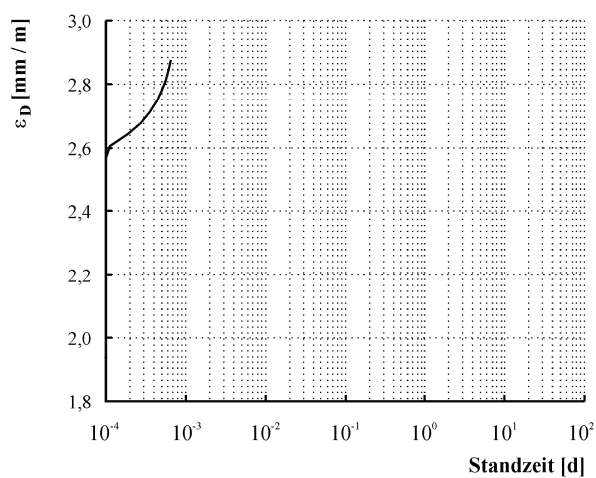
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

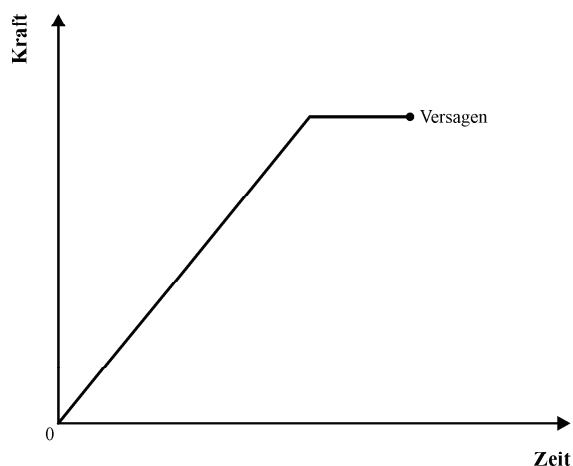


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C5: Probekörper 311 (Porenbeton P2)

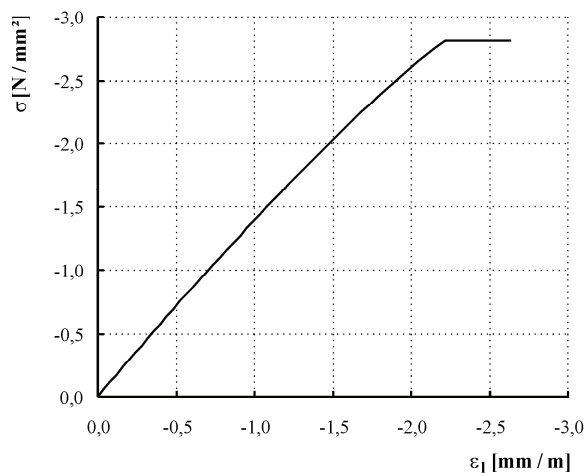
**überwiegend ruhende Belastung**

Material: Porenbeton P2

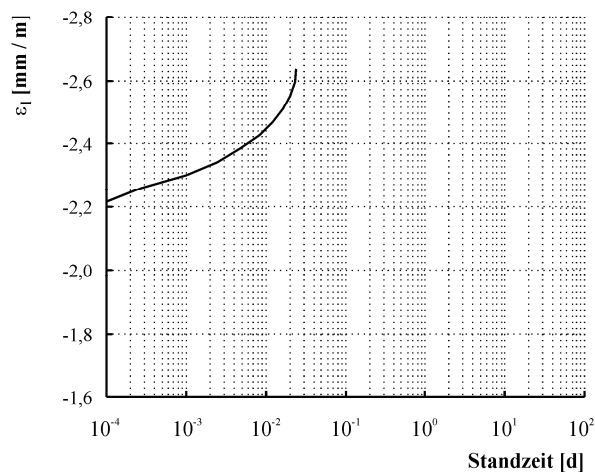
Belastungsgeschwindigkeit: 0,01 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,90 f_{cm}

ertragene Standzeit: 2083 s

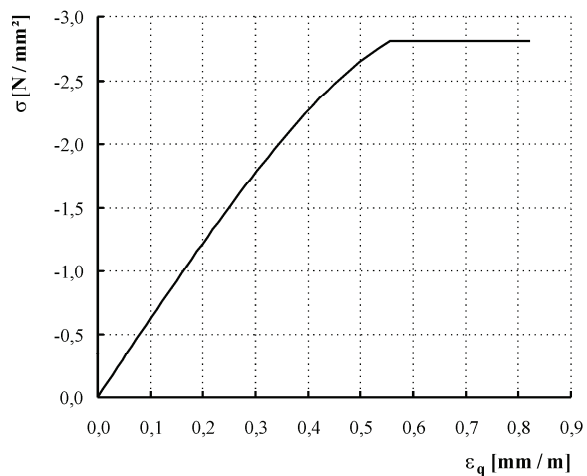
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



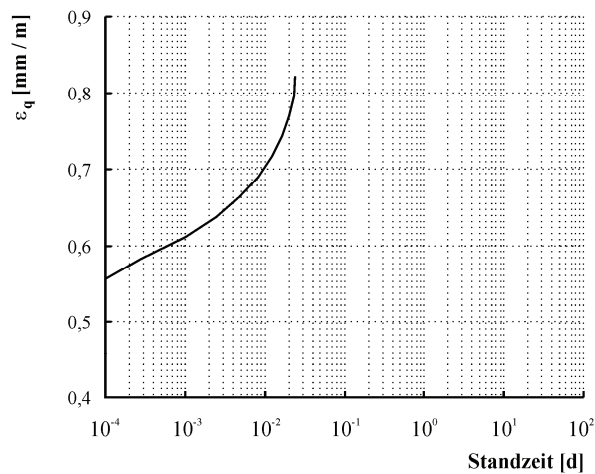
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



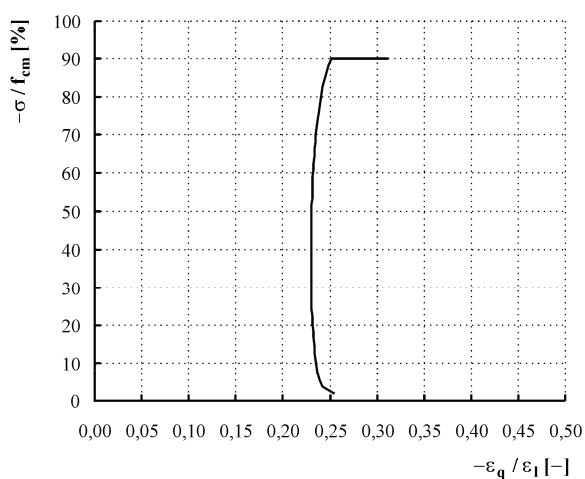
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



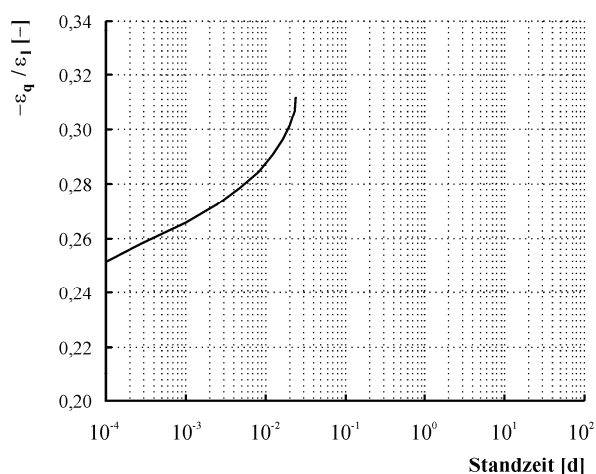
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C5: Probekörper 311 (Porenbeton P2)

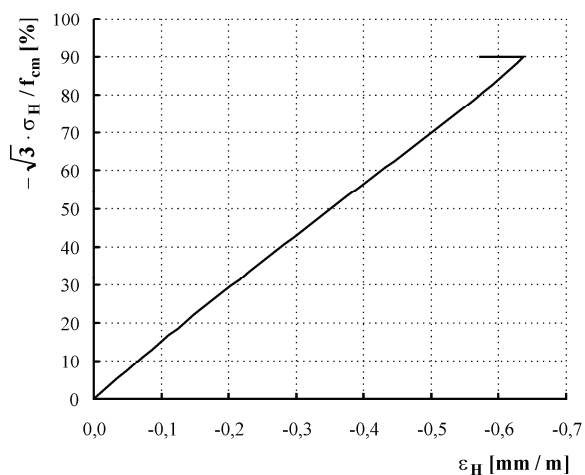
- Fortsetzung -



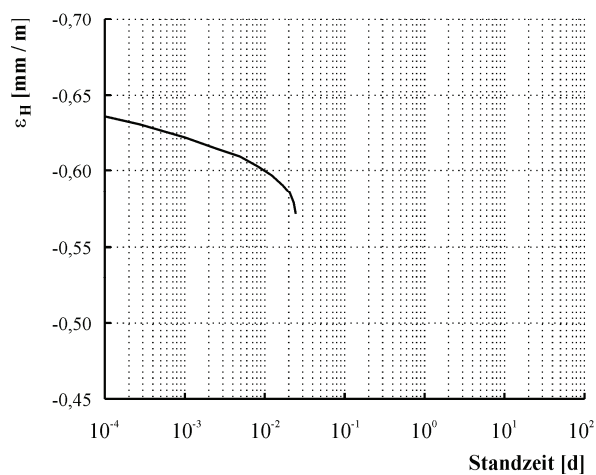
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



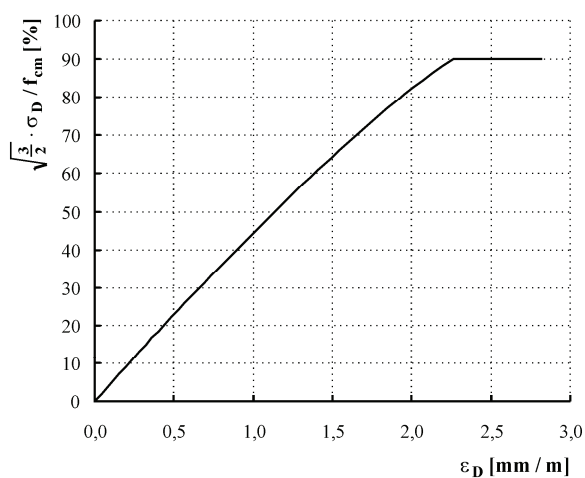
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



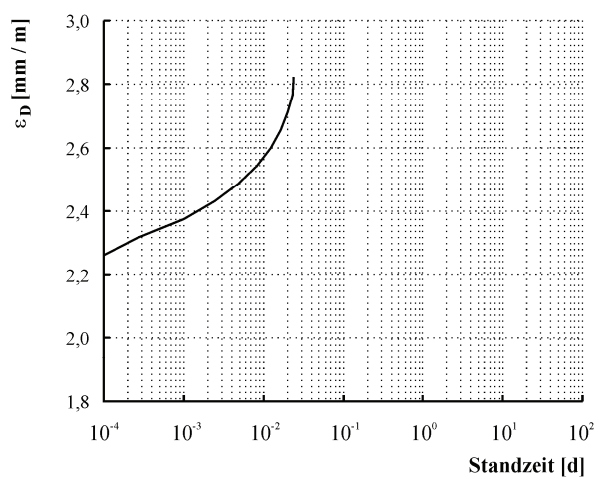
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

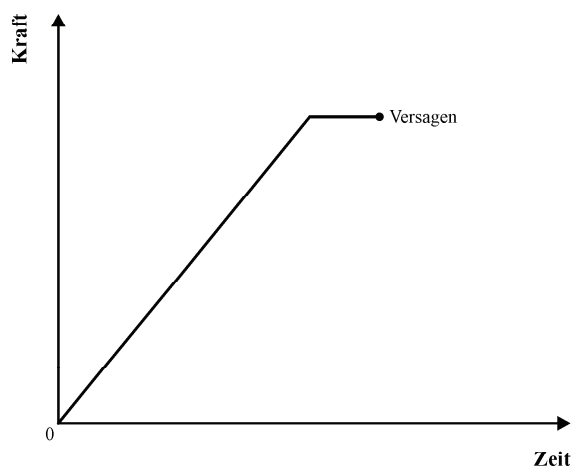


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C6: Probekörper 312 (Porenbeton P2)

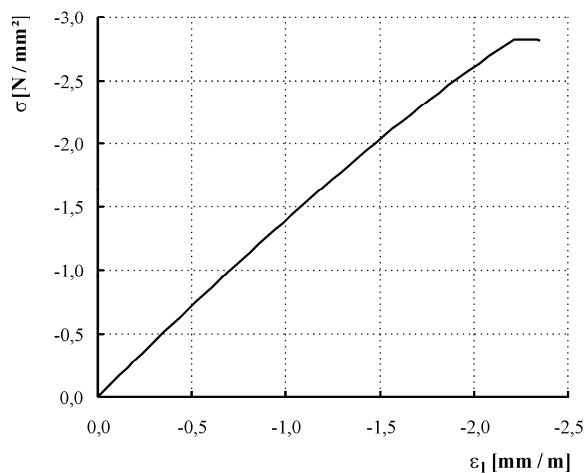
**überwiegend ruhende Belastung**

Material: Porenbeton P2

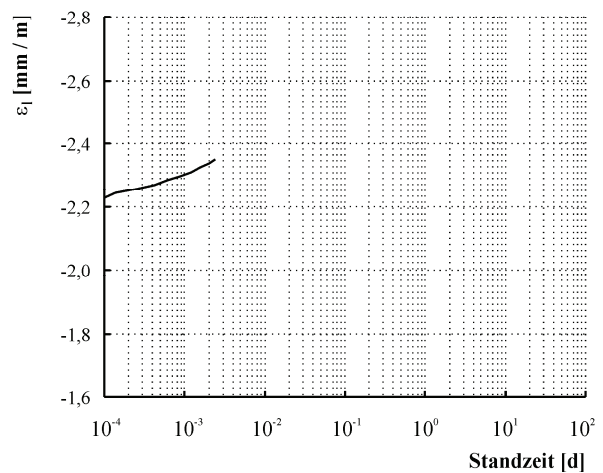
Belastungsgeschwindigkeit: 0,01 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,90 f_{cm}

ertragene Standzeit: 211 s

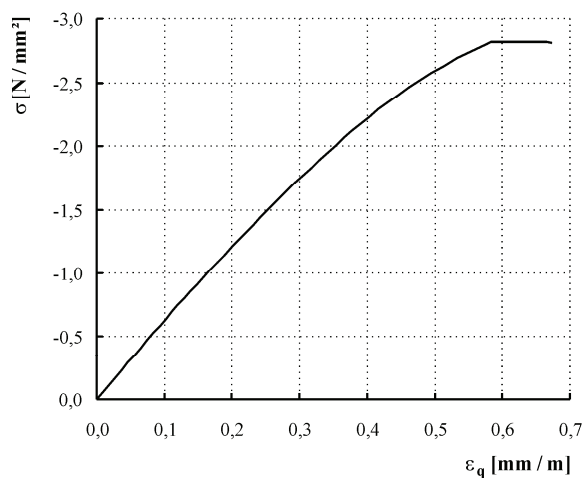
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



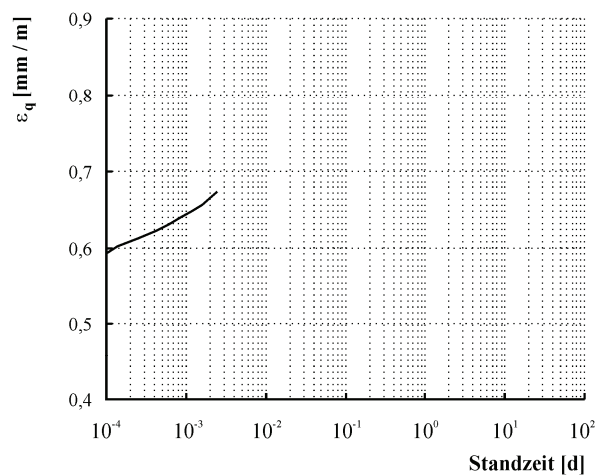
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



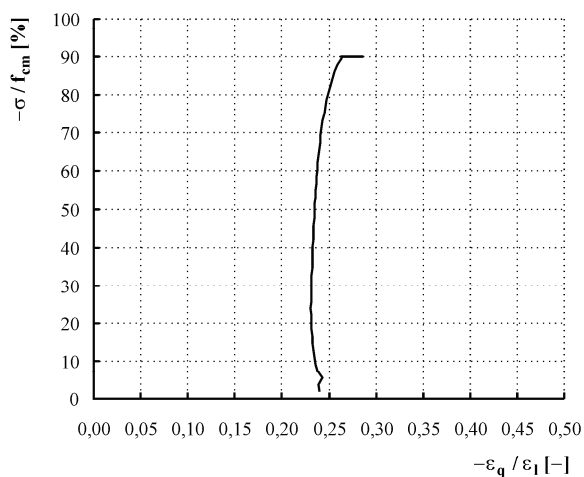
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



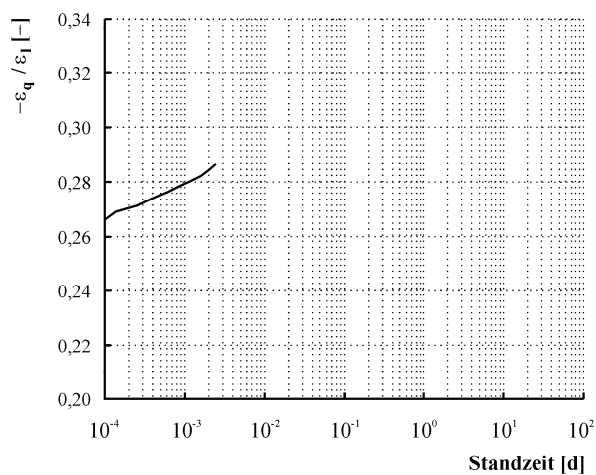
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C6: Probekörper 312 (Porenbeton P2)

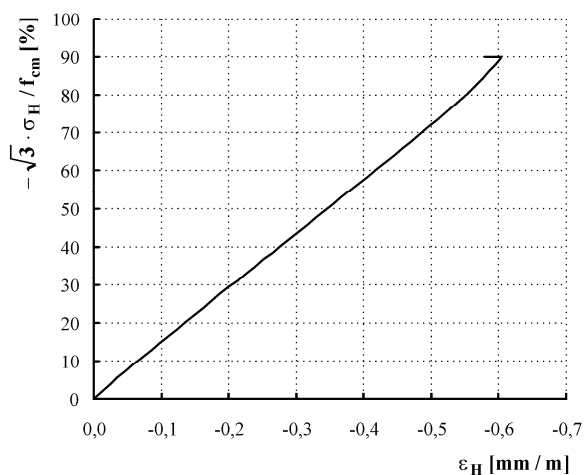
- Fortsetzung -



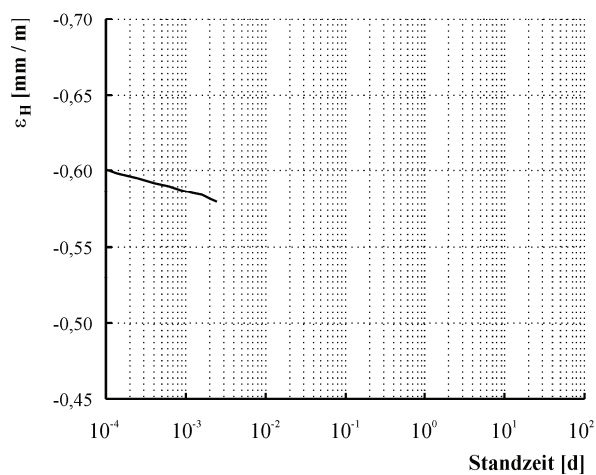
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



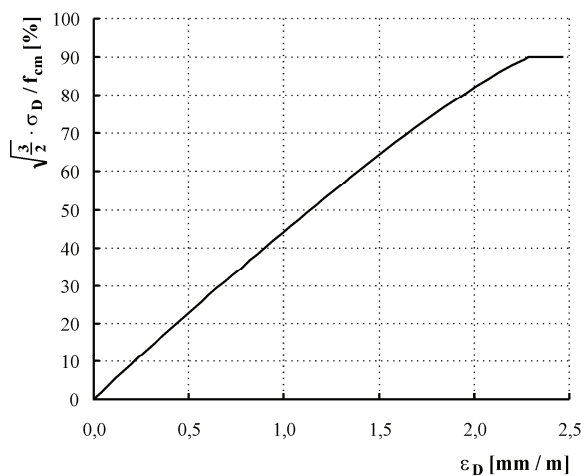
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



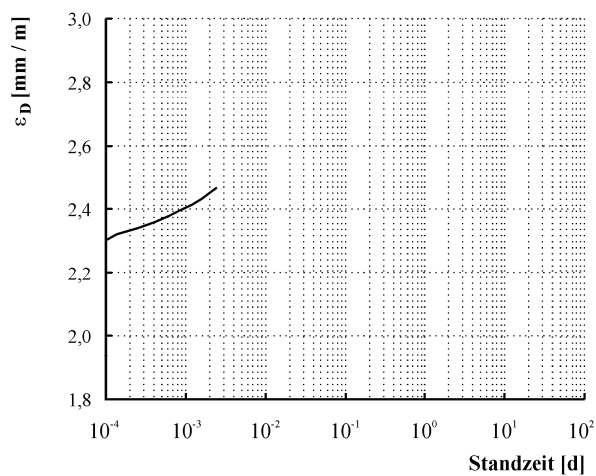
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

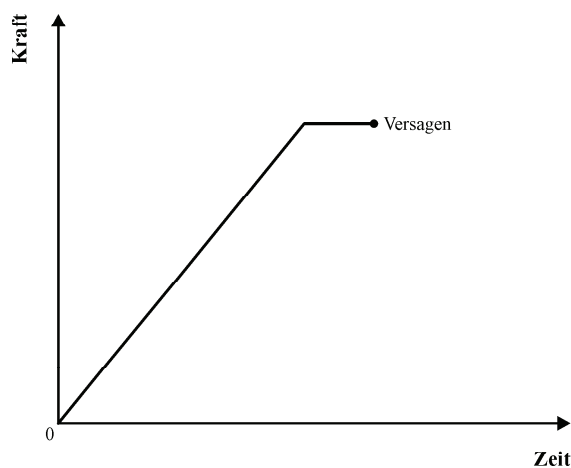


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C7: Probekörper 313 (Porenbeton P2)

**überwiegend ruhende Belastung**

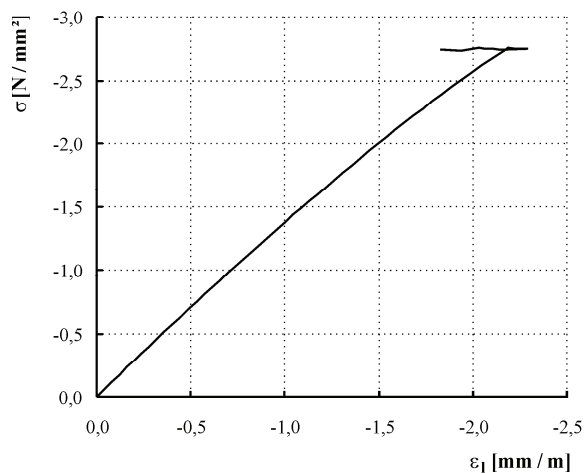
Material: Porenbeton P2

Belastungsgeschwindigkeit: 0,01 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,88 f_{cm}

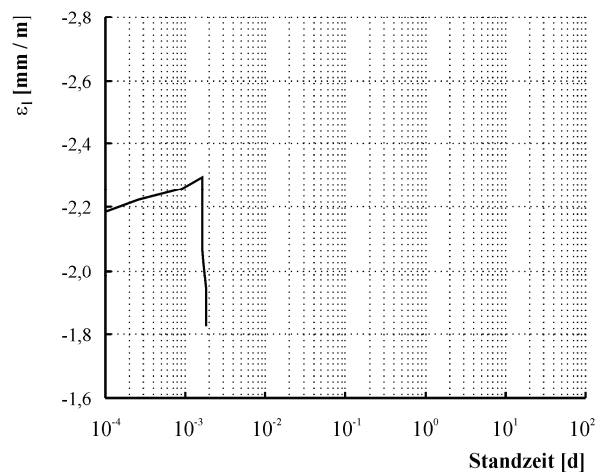
ertragene Standzeit: 156 s

Unregelmäßigkeiten bei Längs- und Querverformungen

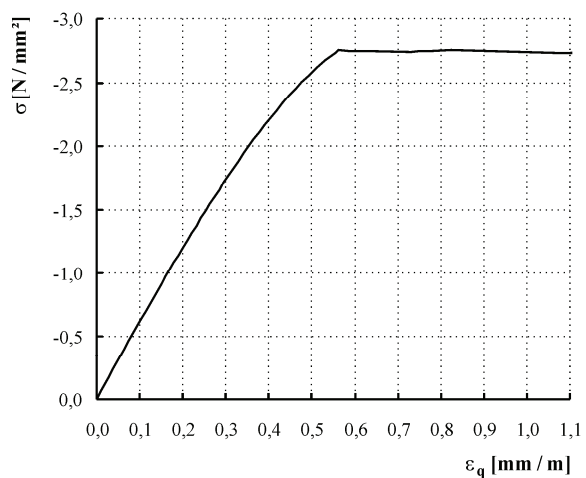
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



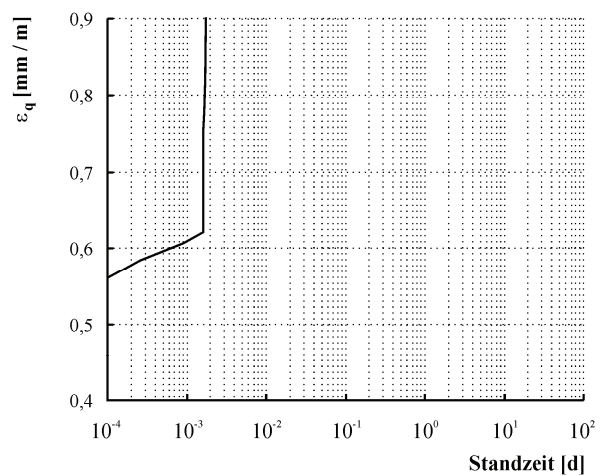
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



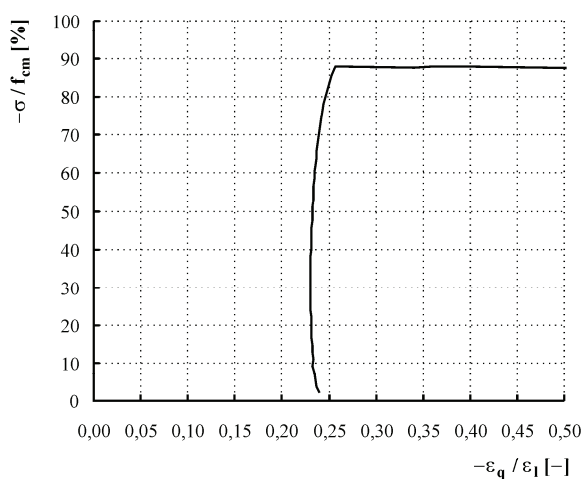
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



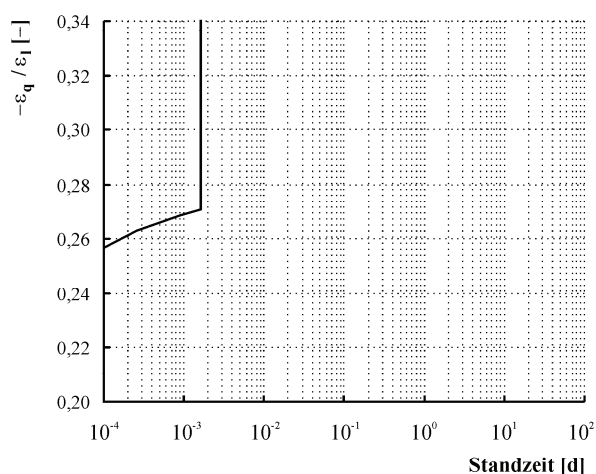
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C7: Probekörper 313 (Porenbeton P2)

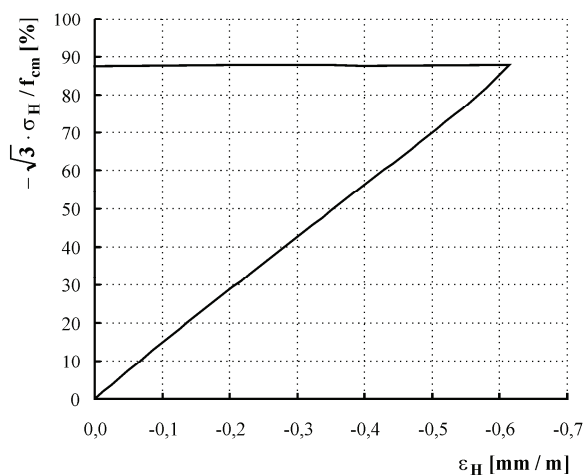
- Fortsetzung -



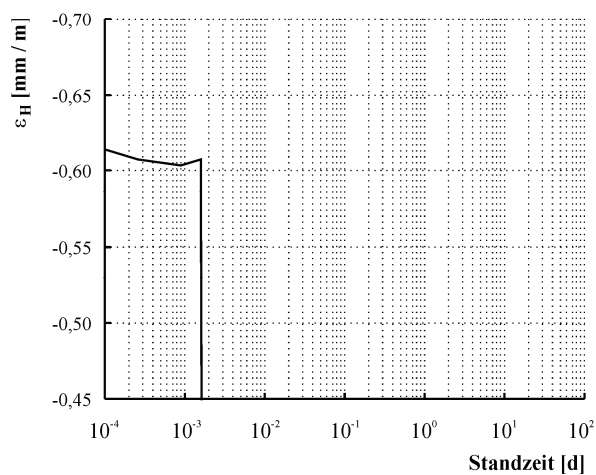
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



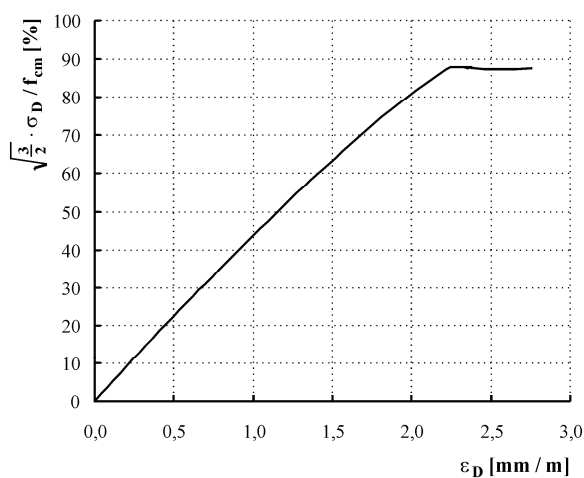
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



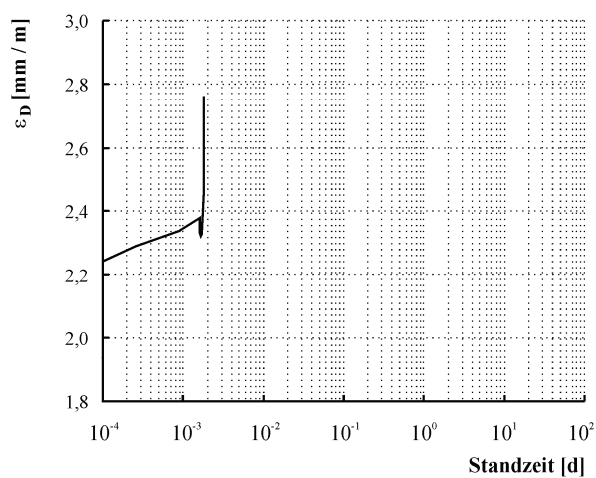
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

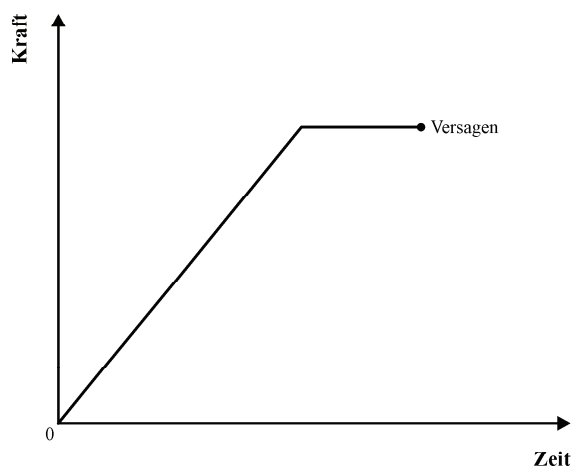


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C8: Probekörper 315 (Porenbeton P2)

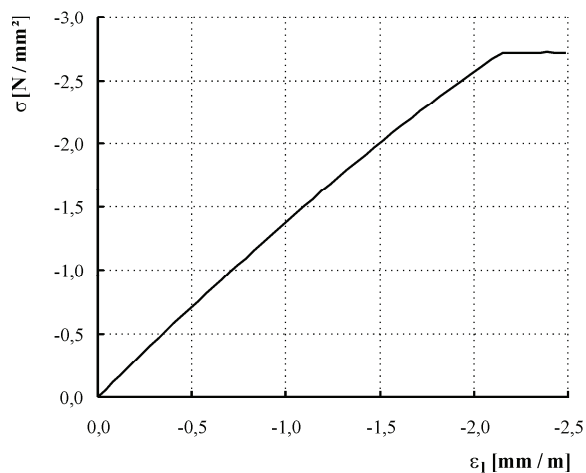
**überwiegend ruhende Belastung**

Material: Porenbeton P2

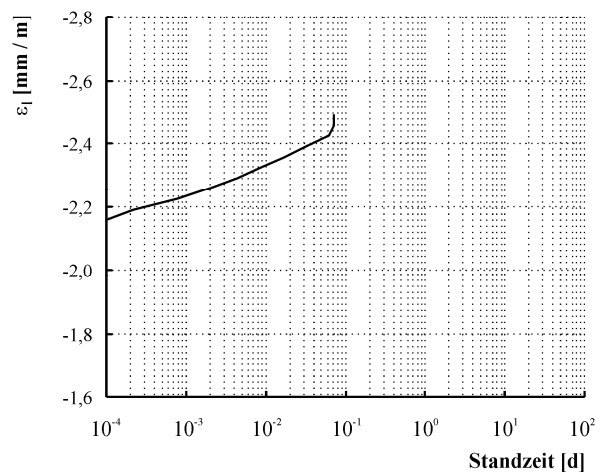
Belastungsgeschwindigkeit: 0,01 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,869 f_{cm}

ertragene Standzeit: 6289 s

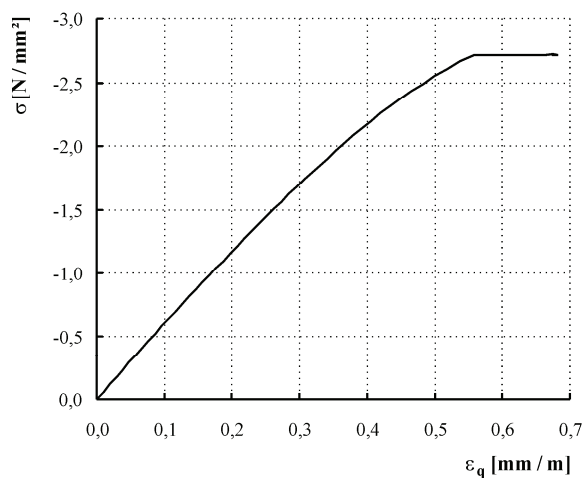
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



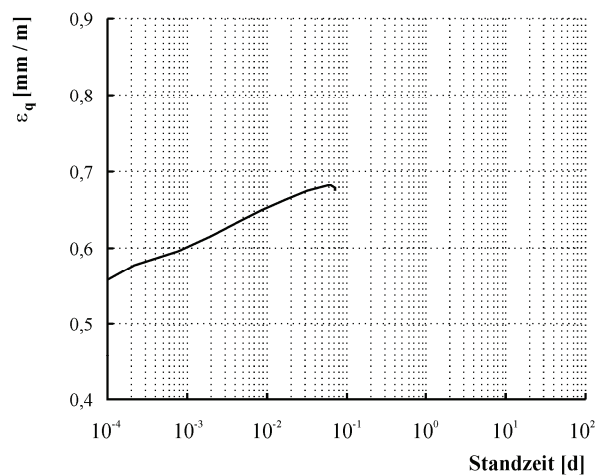
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



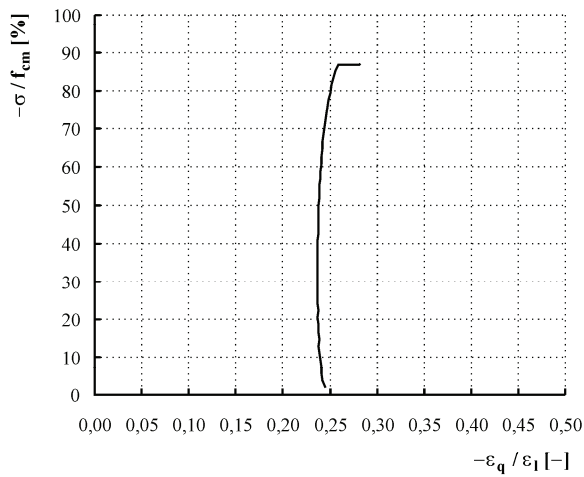
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



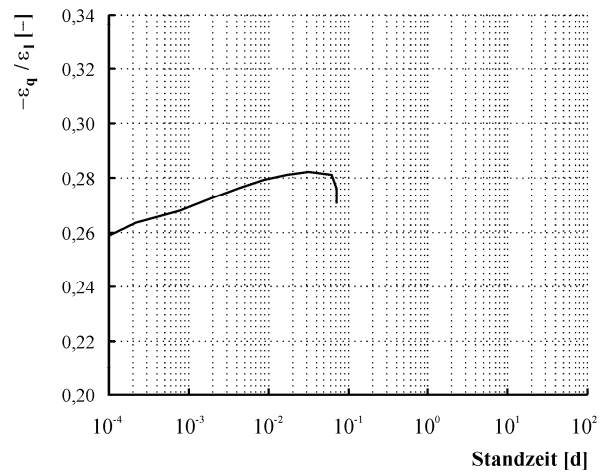
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C8: Probekörper 315 (Porenbeton P2)

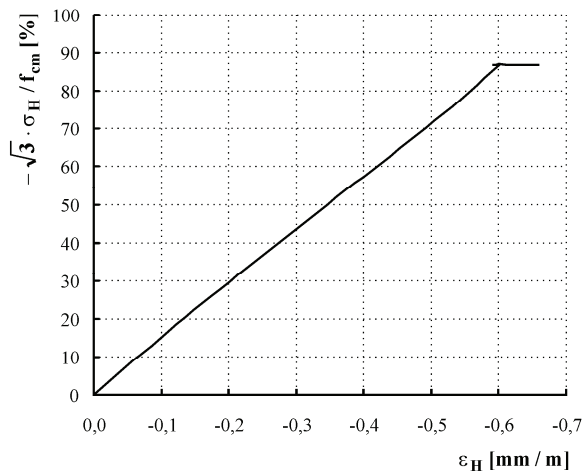
- Fortsetzung -



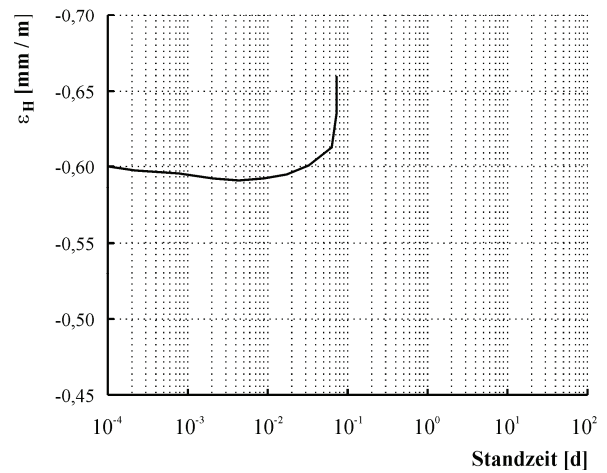
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



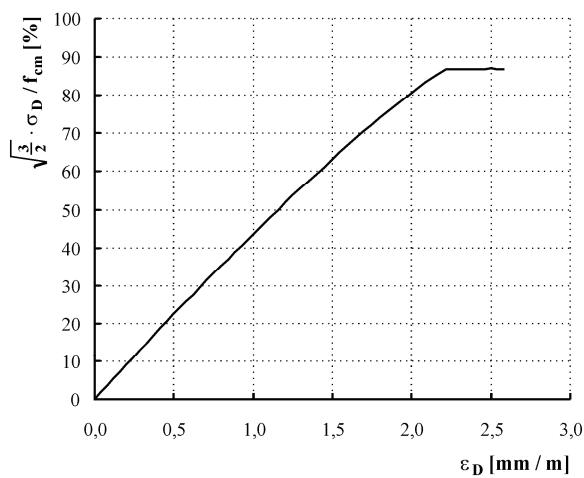
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



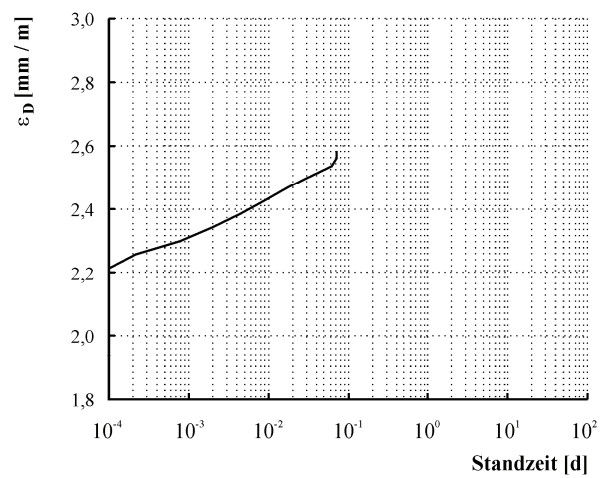
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

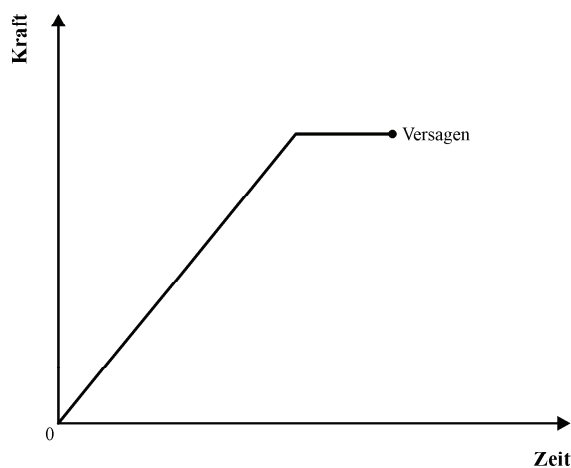


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C9: Probekörper 310 (Porenbeton P2)



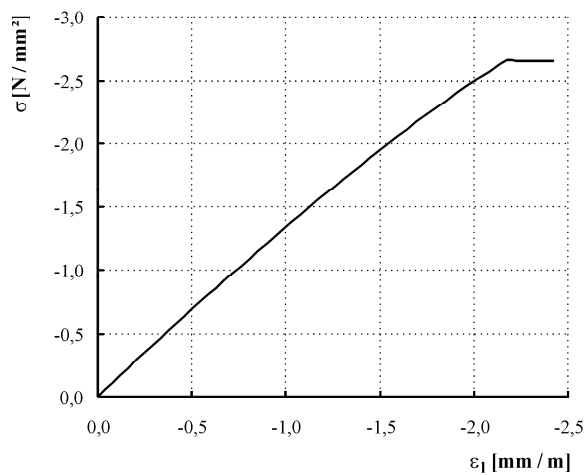
überwiegend ruhende Belastung

Material: Porenbeton P2

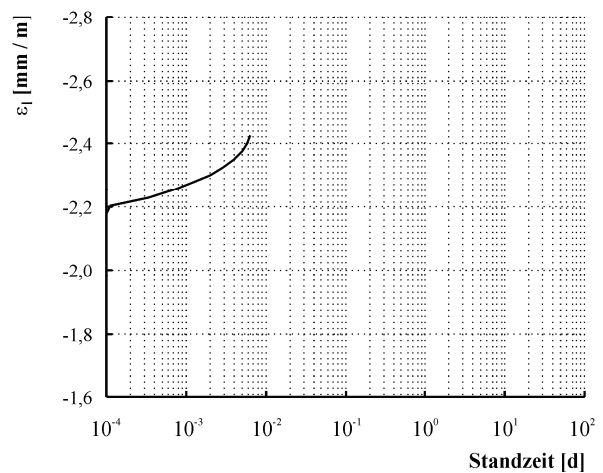
Belastungsgeschwindigkeit: 0,01 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,85 f_{cm}

ertragene Standzeit: 548 s

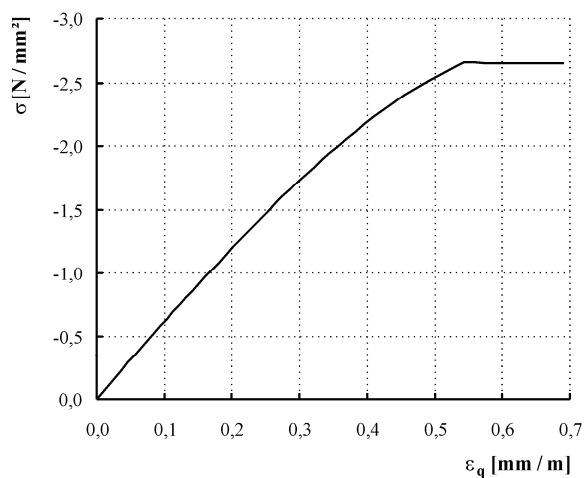
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



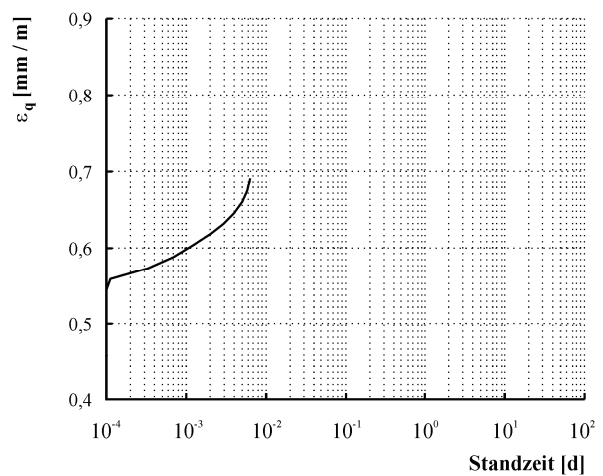
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



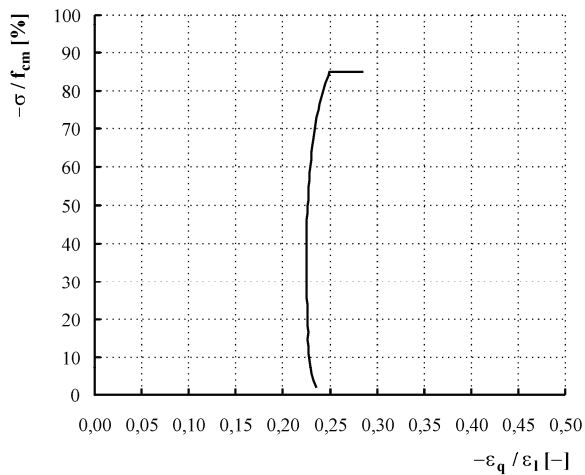
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



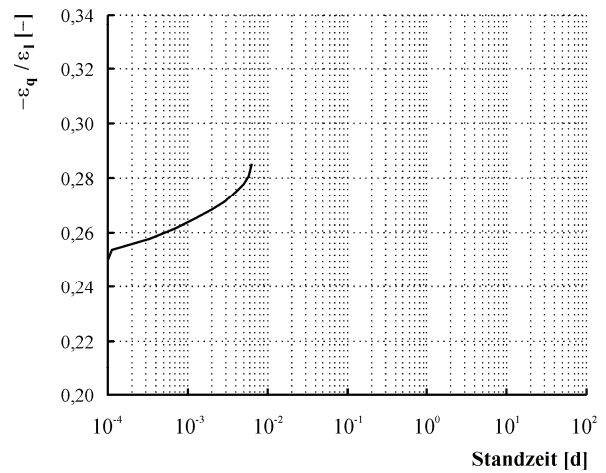
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C9: Probekörper 310 (Porenbeton P2)

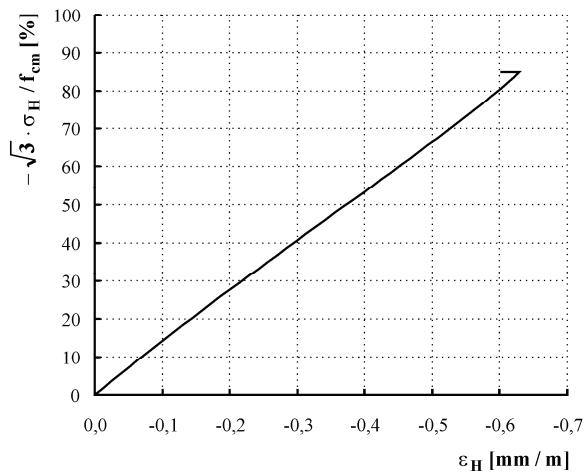
- Fortsetzung -



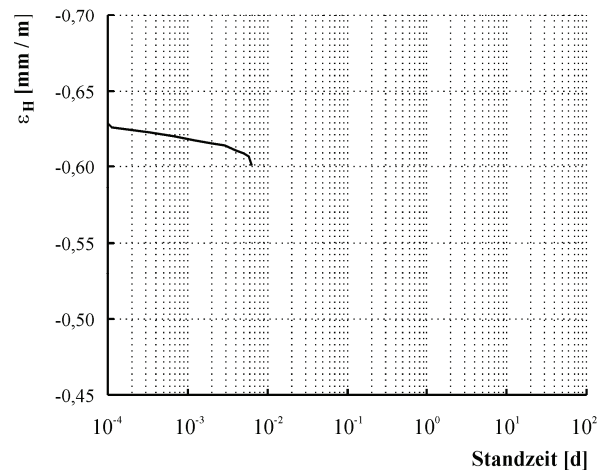
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



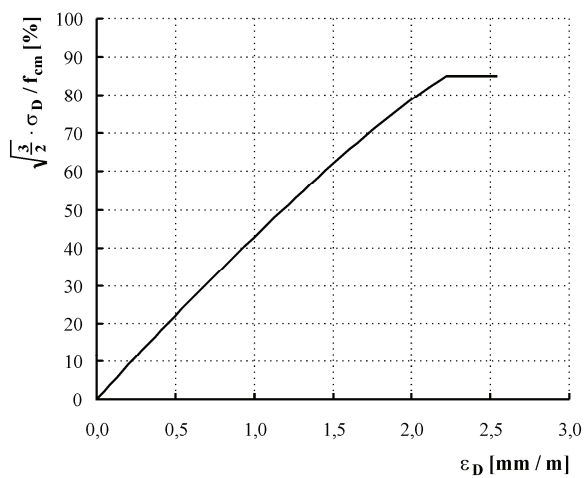
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



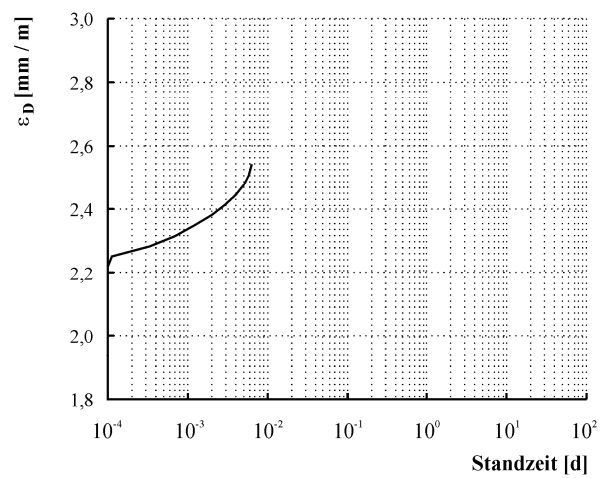
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

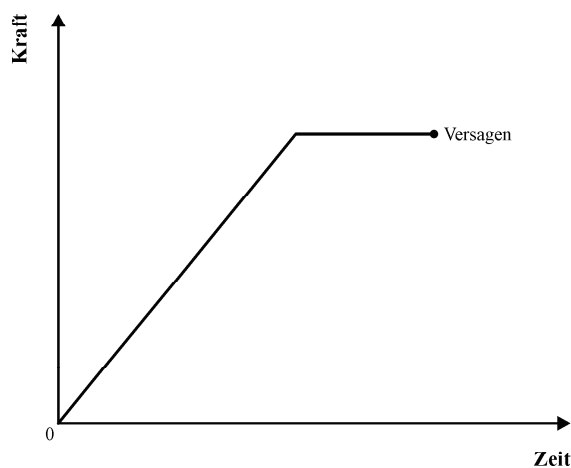


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C10: Probekörper 307 (Porenbeton P2)

**überwiegend ruhende Belastung**

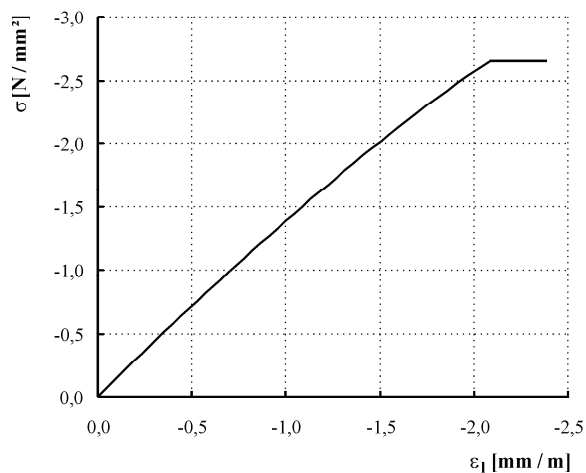
Material: Porenbeton P2

Belastungsgeschwindigkeit: 0,01 N/mm²/sBeanspruchungsintensität: 0,848 f_{cm}

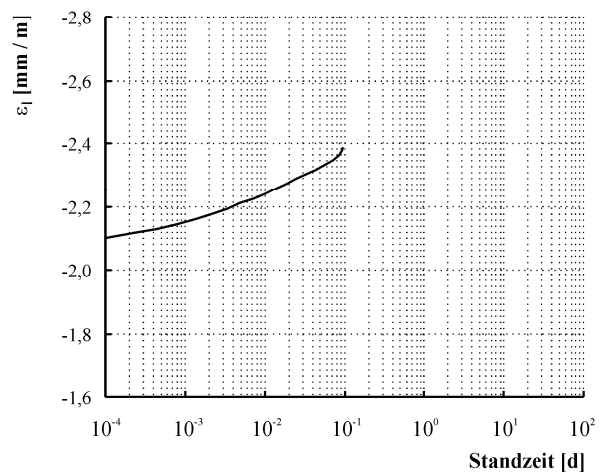
ertragene Standzeit: 8191 s

Ausfall eines Dehnungsmessstreifens (längs)

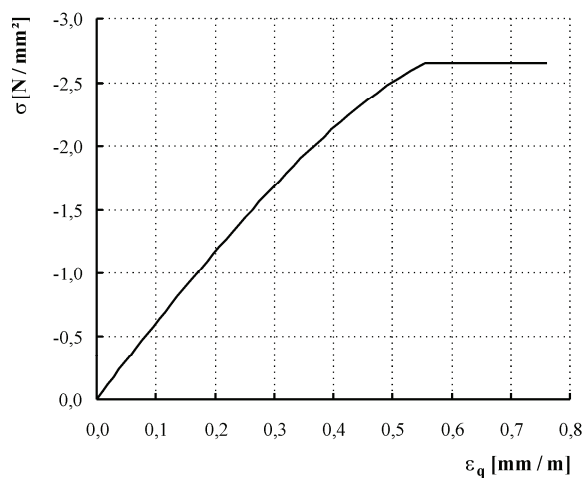
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



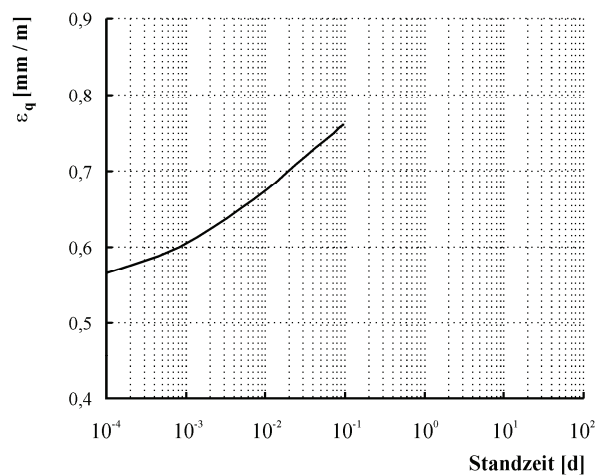
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



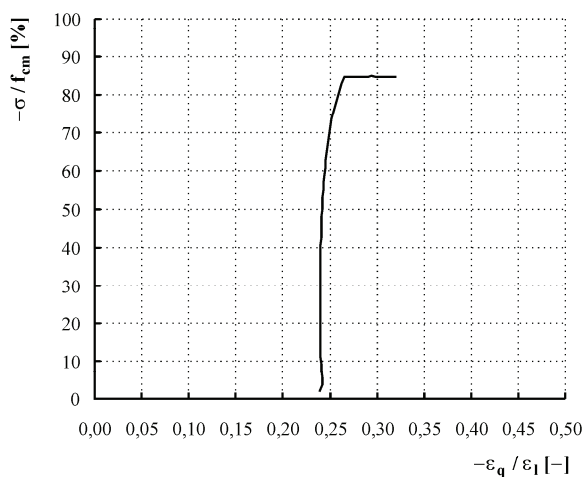
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



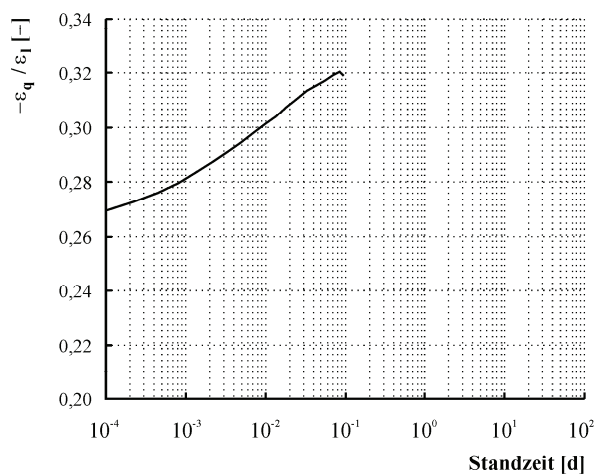
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C10: Probekörper 307 (Porenbeton P2)

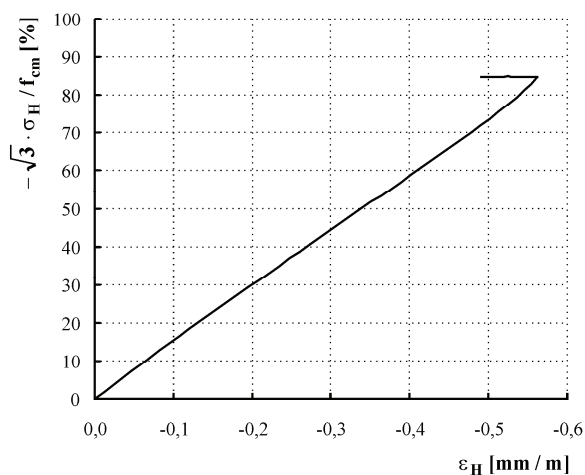
- Fortsetzung -



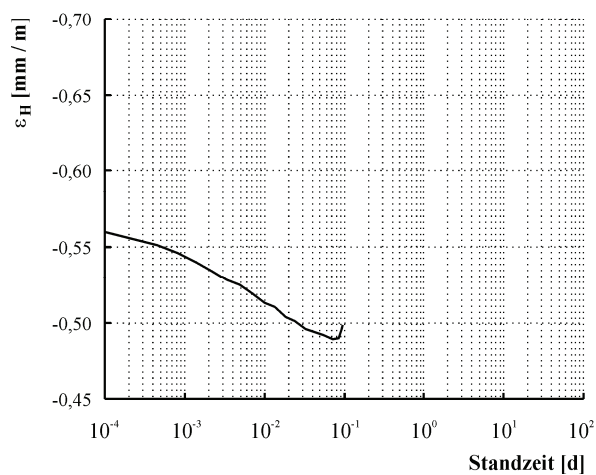
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



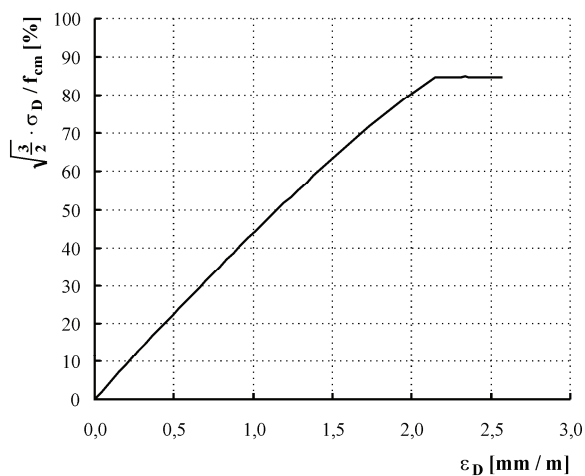
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



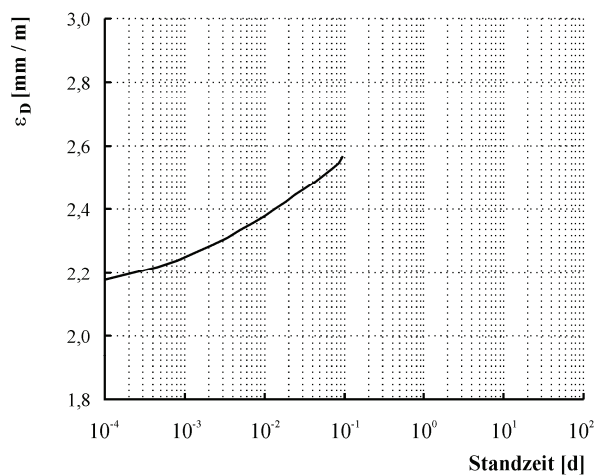
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

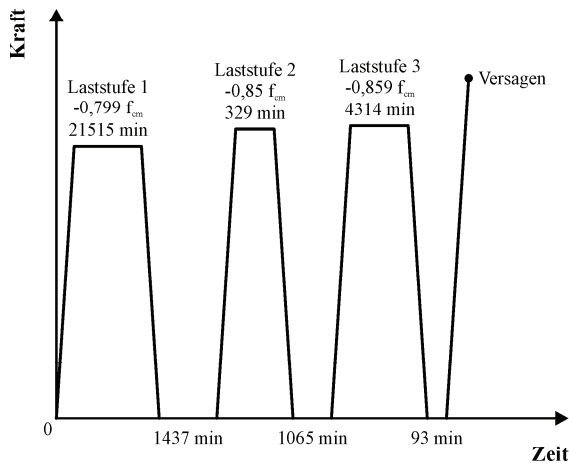


j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C11: Probekörper 305 (Porenbeton P2)



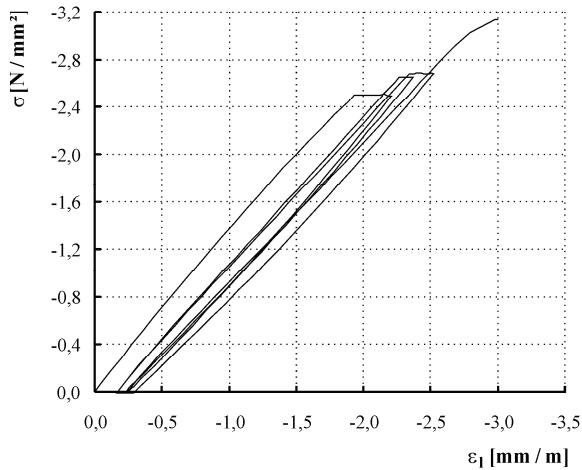
überwiegend ruhende Belastung, Zyklen

Material: Porenbeton P2

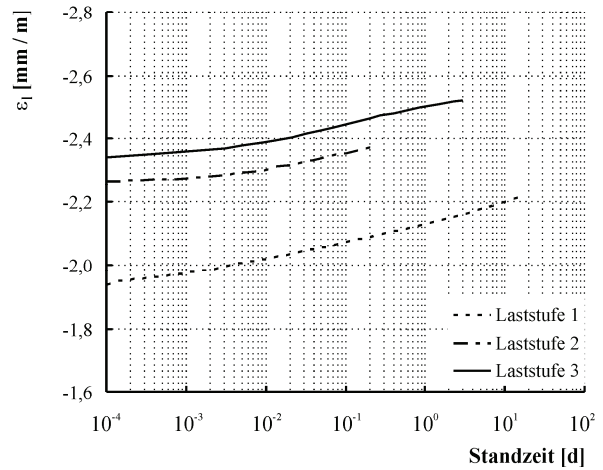
Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: 0,01 N/mm²/s

Beanspruchungsintensitäten: 0,799 f_{cm} , 0,85 f_{cm} , 0,859 f_{cm}
 Standzeiten: 1290879 s, 19745 s, 258858 s

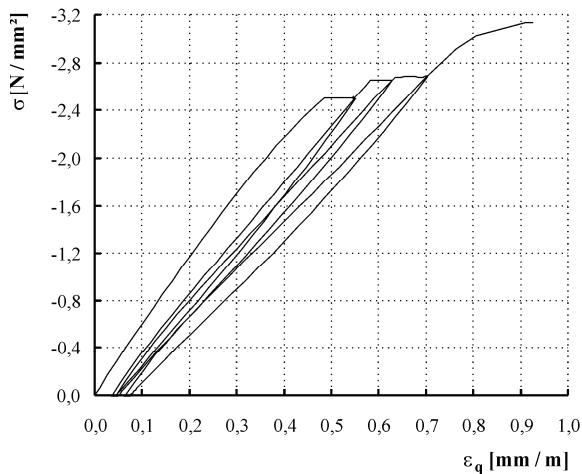
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



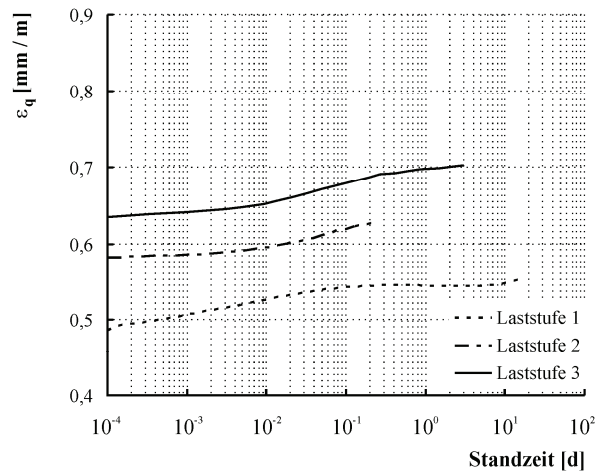
b) Längsdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



c) Längsdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



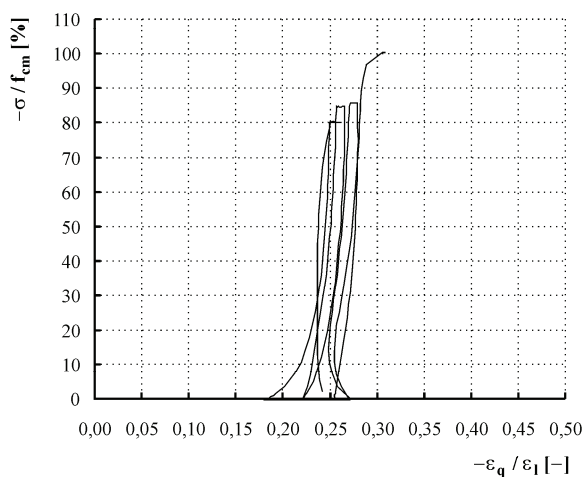
d) Querdehnung in Abhängigkeit von der Spannung



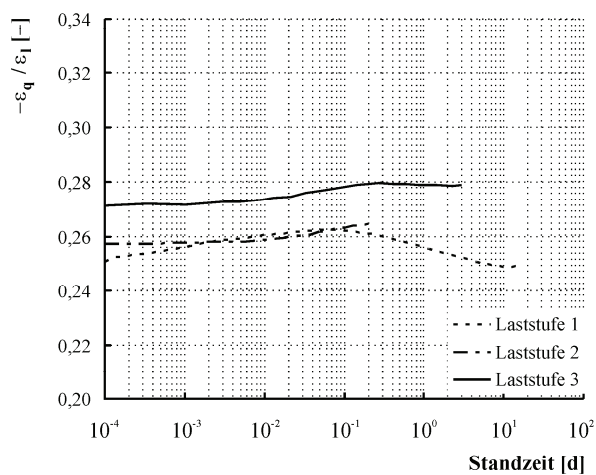
e) Querdehnung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C11: Probekörper 305 (Porenbeton P2)

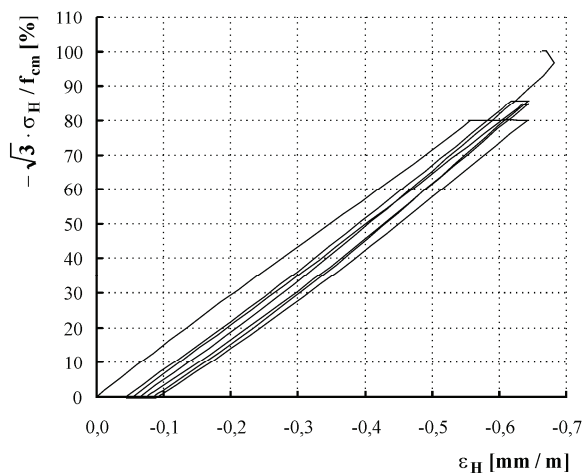
- Fortsetzung 1 -



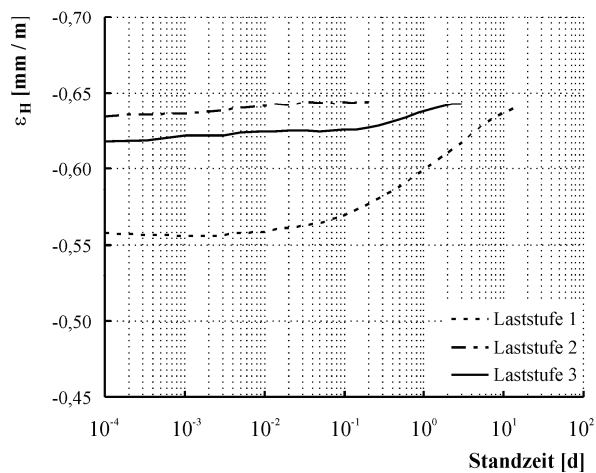
f) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



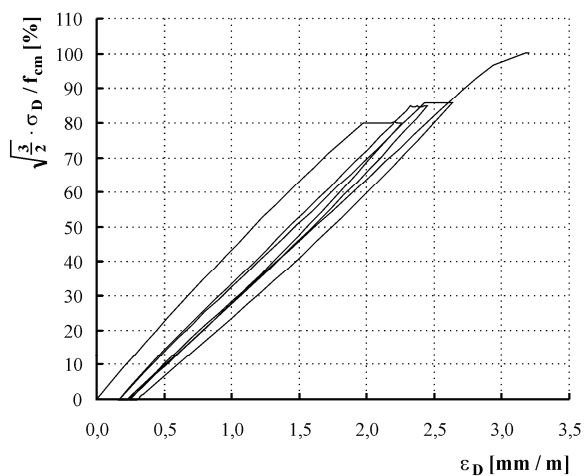
g) Querdehnung/Längsstauchung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



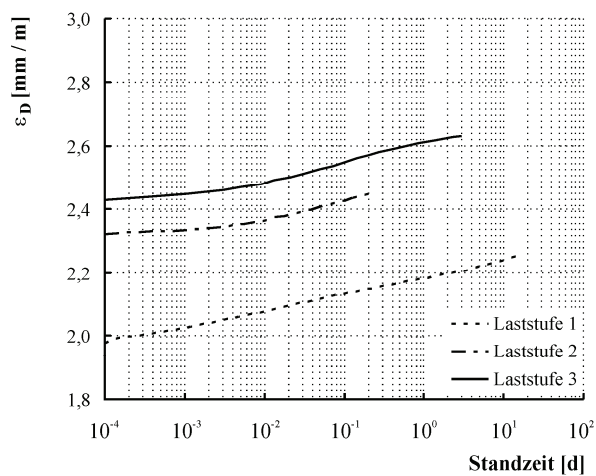
h) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Volumenänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung



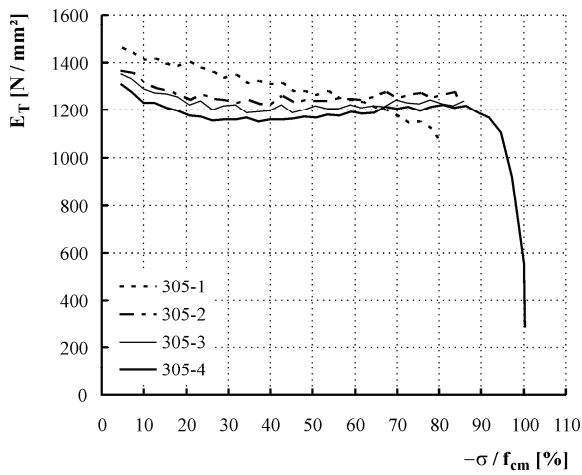
j) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



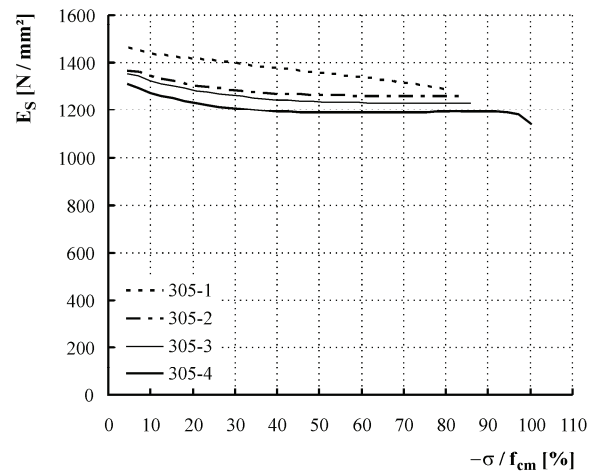
k) Gestaltänderung über der Zeit in der Phase konstanter Spannung

Tafel C11: Probekörper 305 (Porenbeton P2)

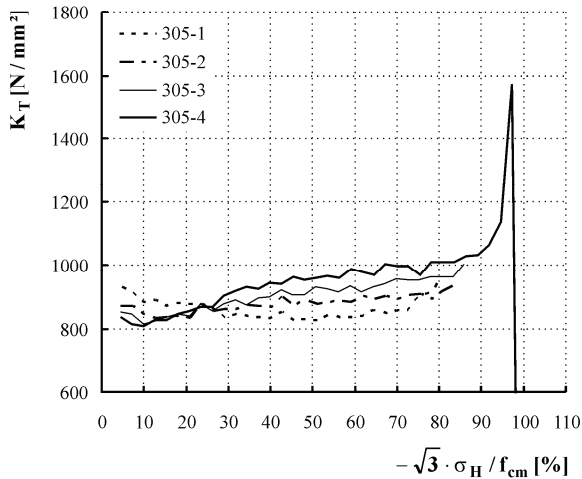
- Fortsetzung 2 -



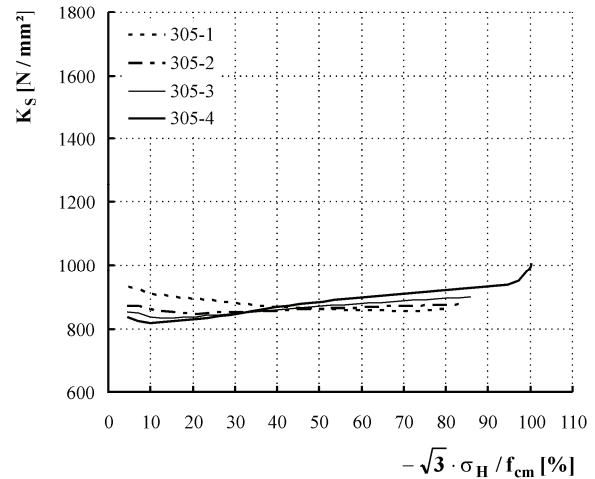
l) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



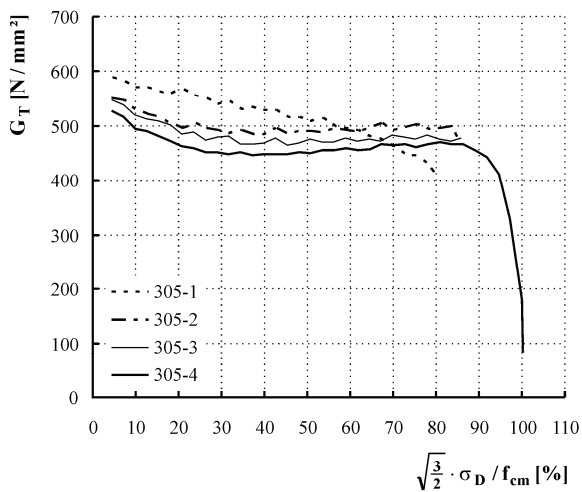
m) Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)



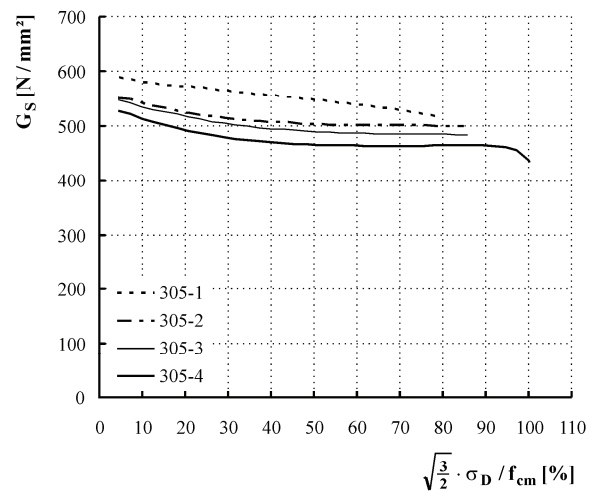
o) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



p) Kompressionsmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

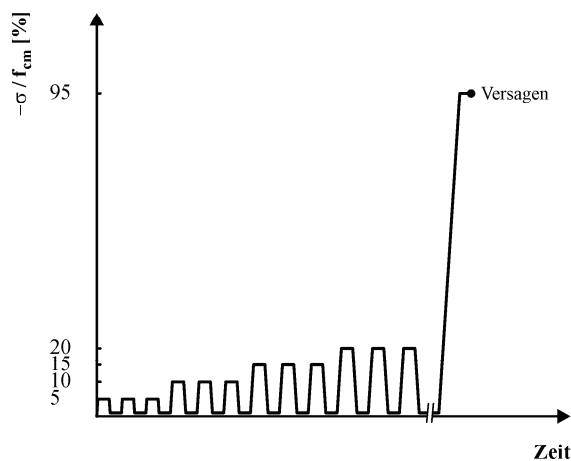


q) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Tangentenmodul)



r) Gleitmodul in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität (Sekantenmodul)

Tafel C12: Probekörper 314 (Porenbeton P2)

**schrittweise gesteigerte Belastung**

Material: Porenbeton P2

Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: 0,1 N/mm²/s

Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 180 s

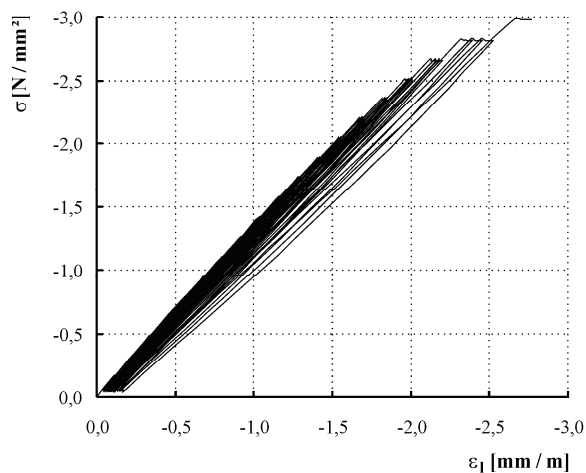
Grundlast: 1 kN

Laststufendifferenz: 0,05 f_{cm}

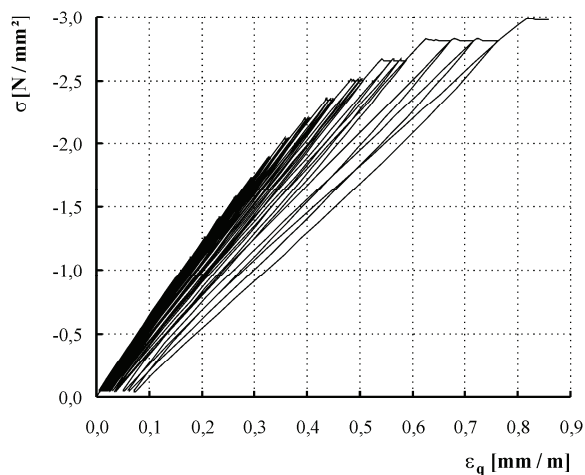
Zyklen je Laststufe: 3

Versagen bei Versuchsende

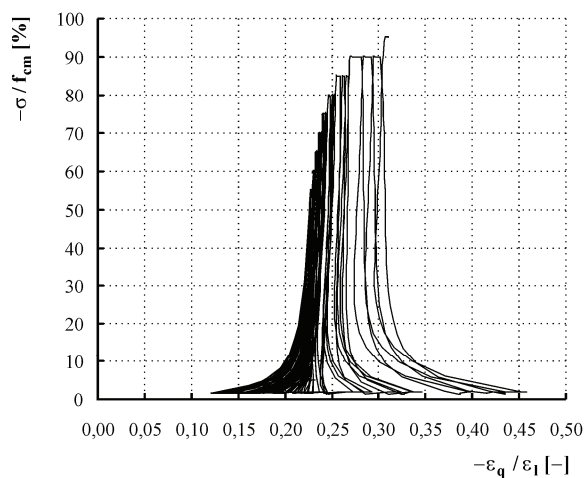
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



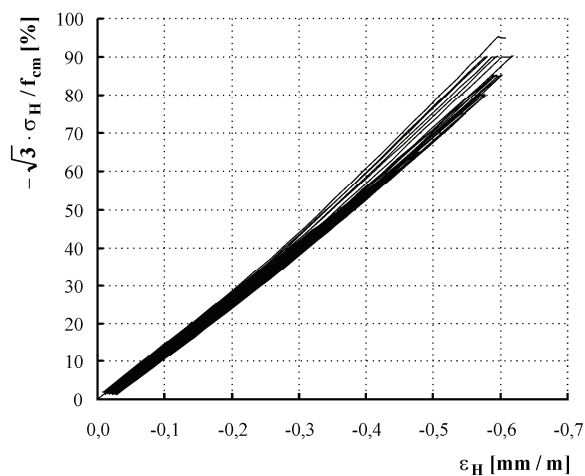
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



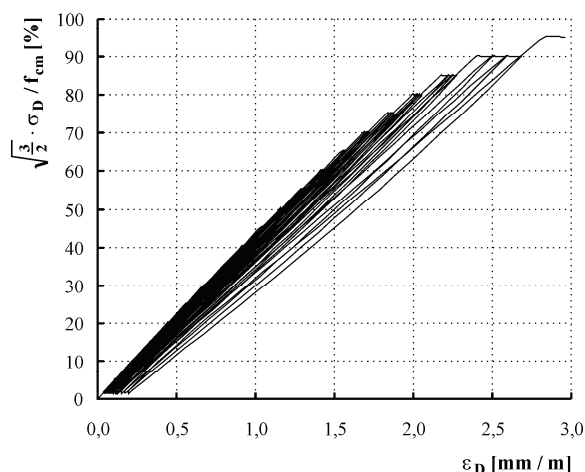
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



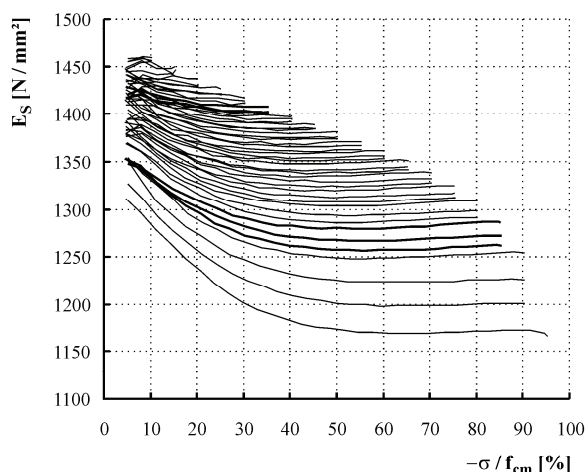
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel C12: Probekörper 314 (Porenbeton P2)

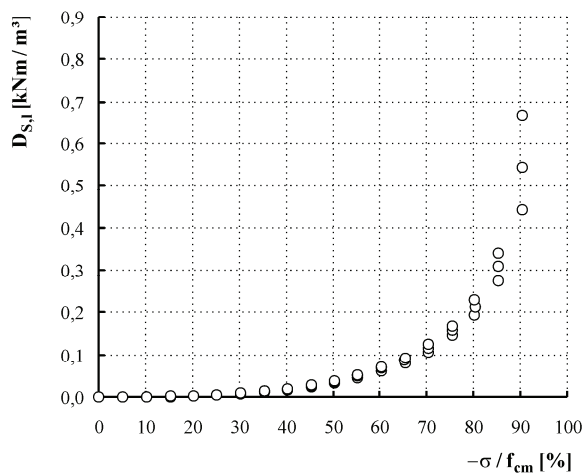
- Fortsetzung -



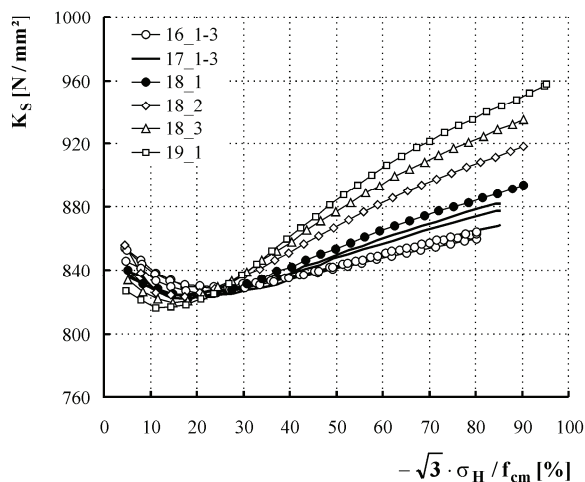
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



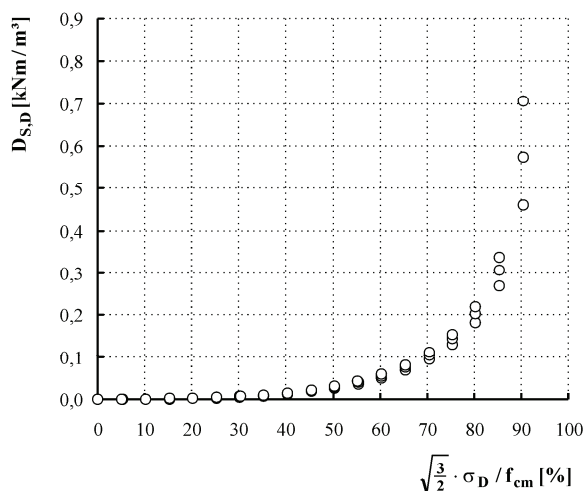
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade



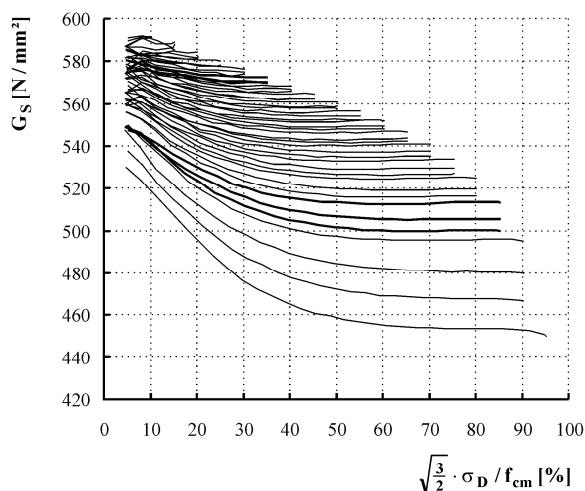
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade ausgewählter Zyklen

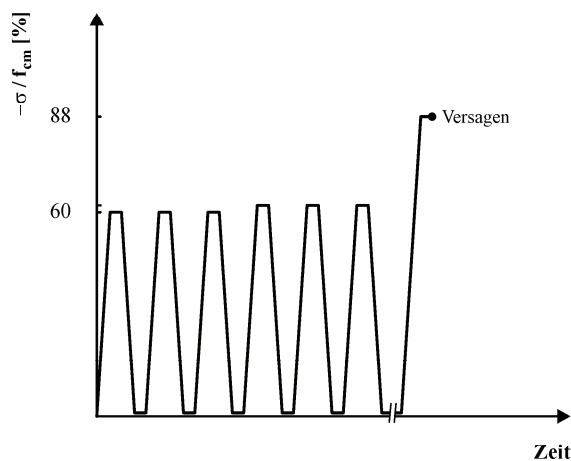


j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade

Tafel C13: Probekörper 316 (Porenbeton P2)



schrittweise gesteigerte Belastung

Material: Porenbeton P2

Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: 0,1 N/mm²/s

Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 180 s

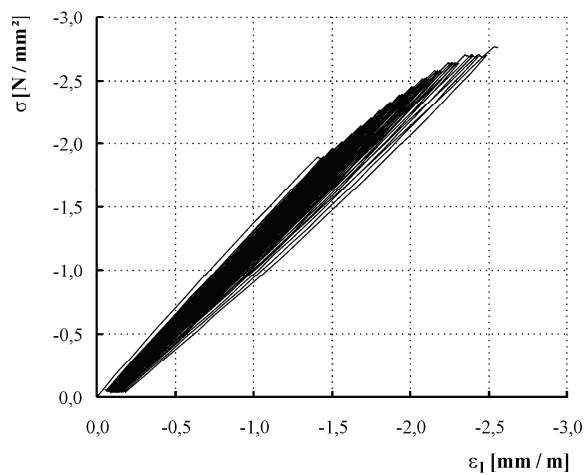
Grundlast: 1 kN

1. Laststufe: 0,60 f_{cm} Laststufendifferenz: 0,02 f_{cm}

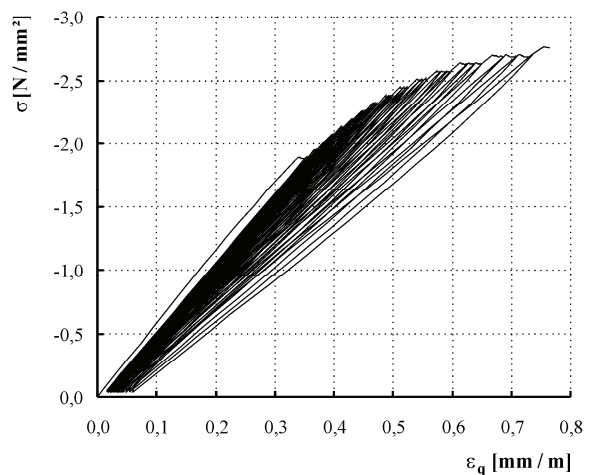
Zyklen je Laststufe: 3

Versagen bei Versuchsende

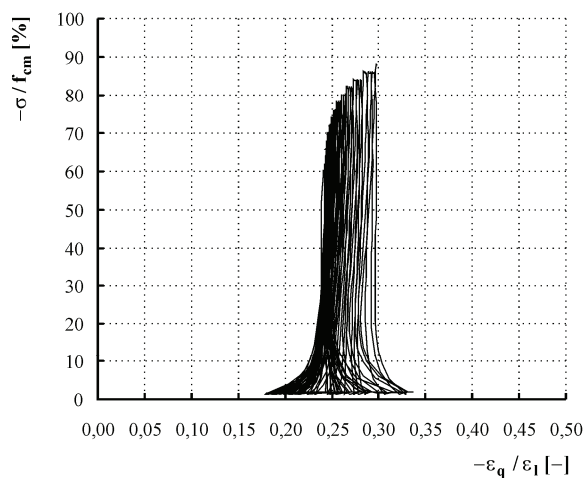
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



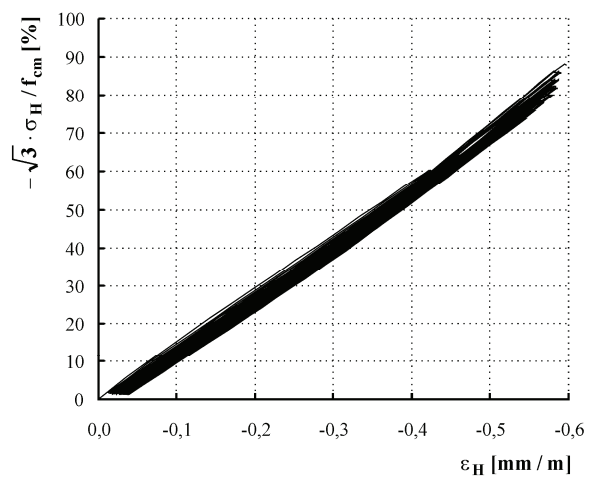
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



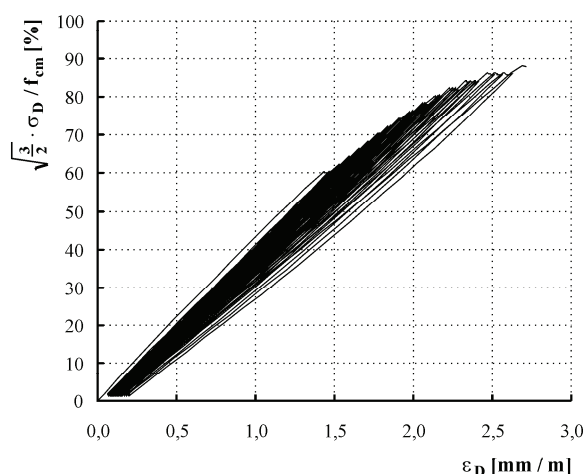
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



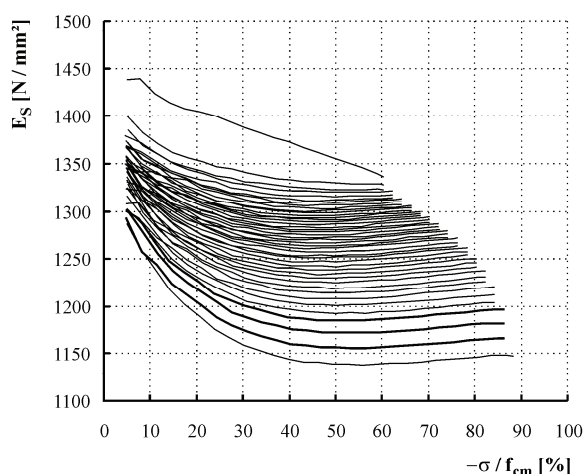
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel C13: Probekörper 316 (Porenbeton P2)

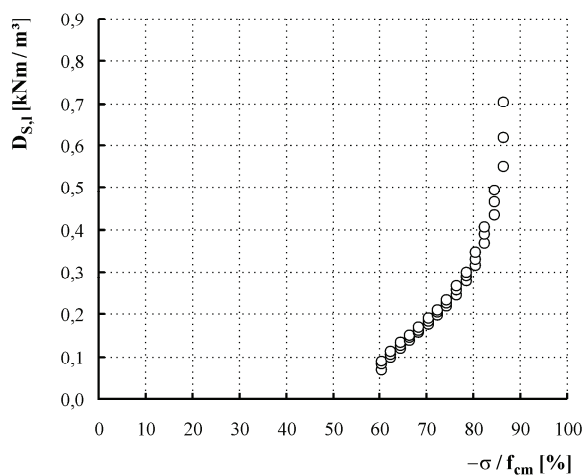
- Fortsetzung -



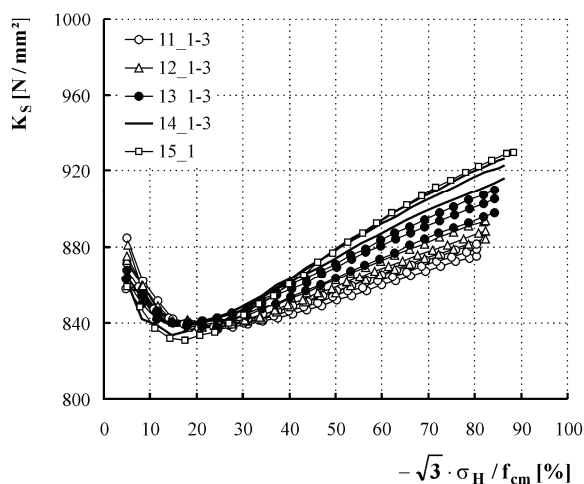
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



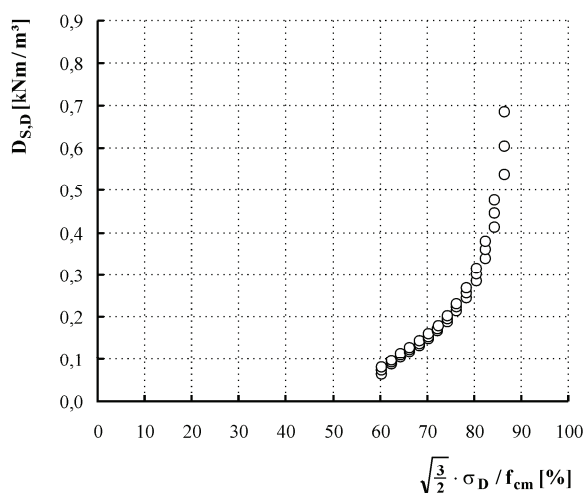
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade



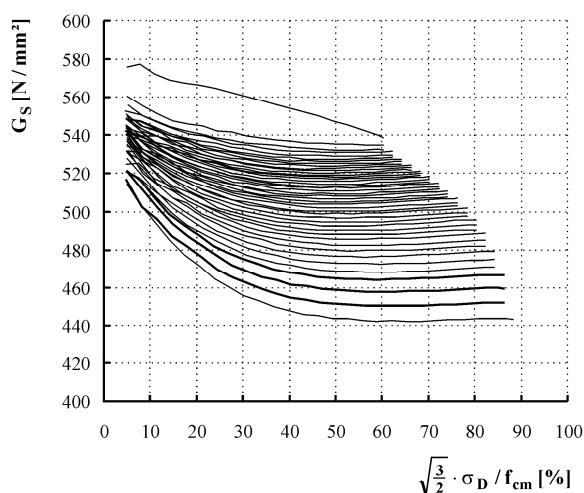
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade ausgewählter Zyklen

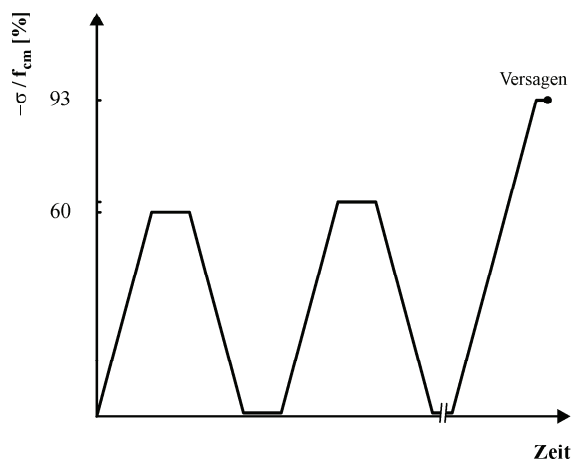


j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade

Tafel C14: Probekörper 306 (Porenbeton P2)



schrittweise gesteigerte Belastung

Material: Porenbeton P2

Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: 0,01 N/mm²/s

Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 600 s

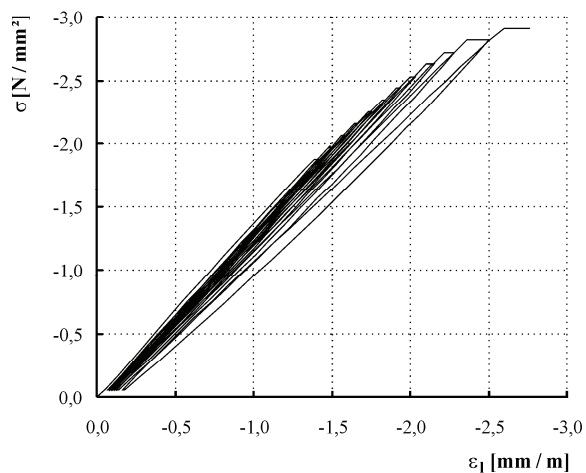
Grundlast: 1 kN

1. Laststufe: 0,60 f_{cm} Laststufendifferenz: 0,03 f_{cm}

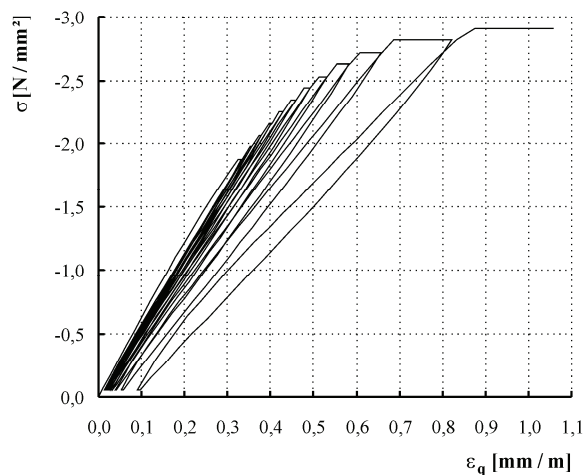
Zyklen je Laststufe: 1

Versagen bei Versuchsende

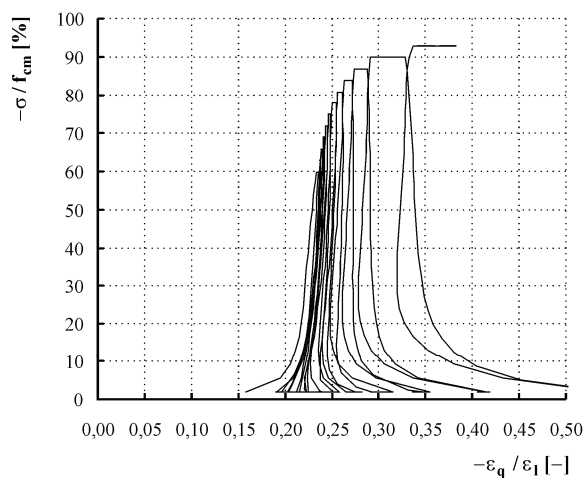
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



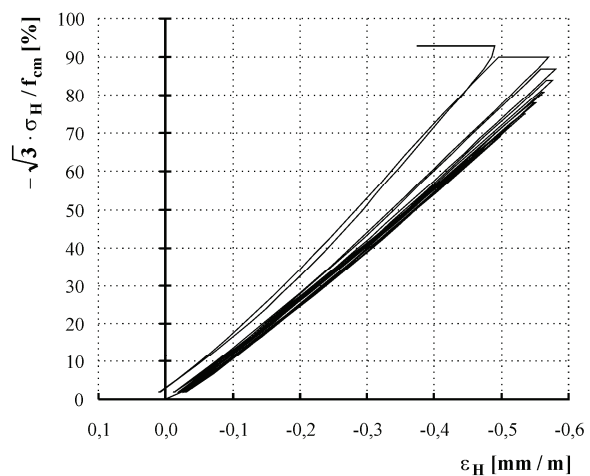
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



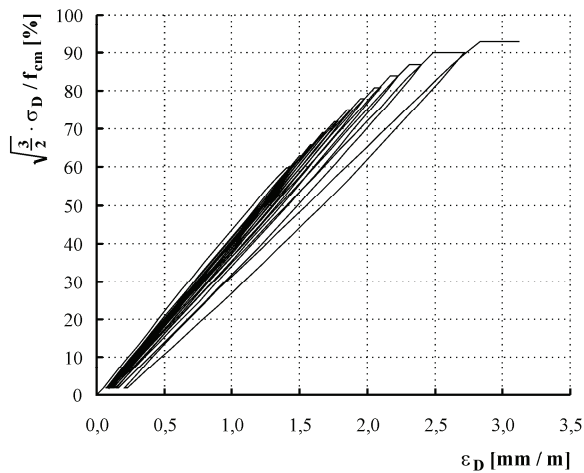
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



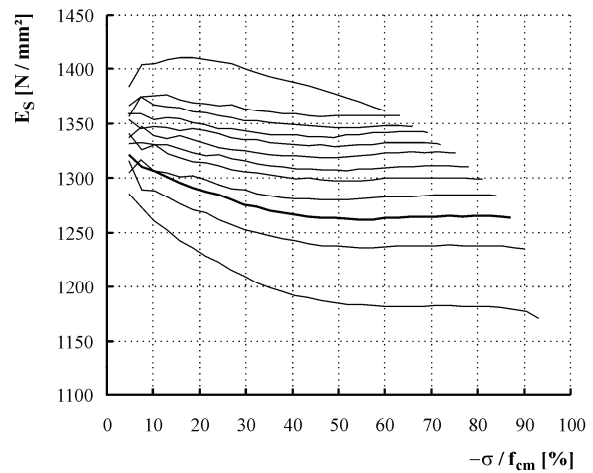
e) Volumenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

Tafel C14: Probekörper 306 (Porenbeton P2)

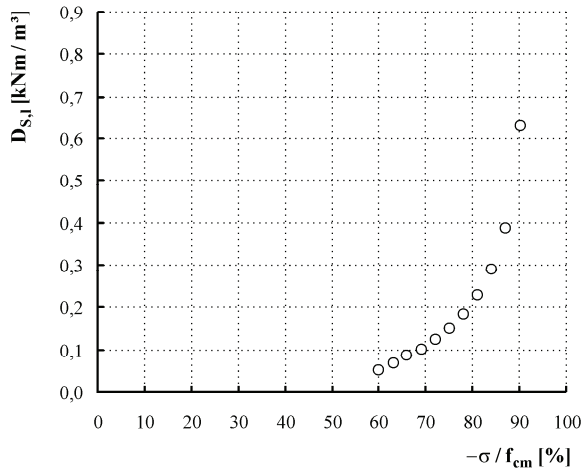
- Fortsetzung -



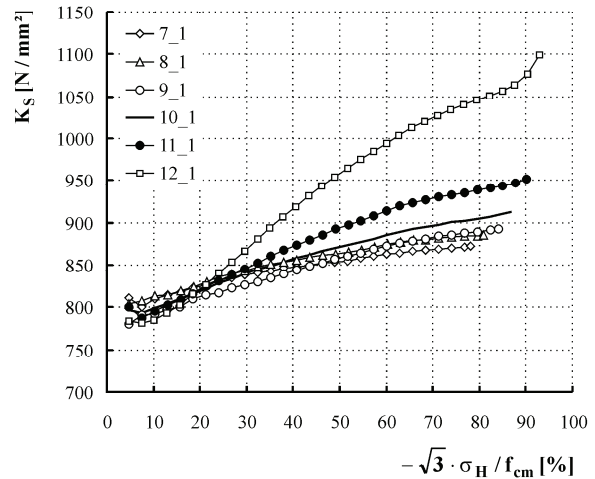
f) Gestaltänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



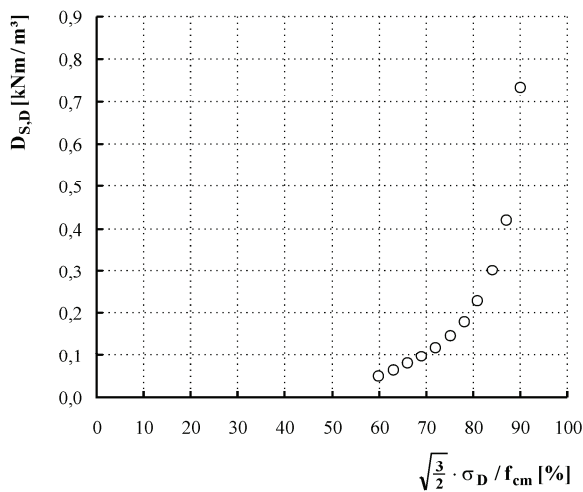
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade



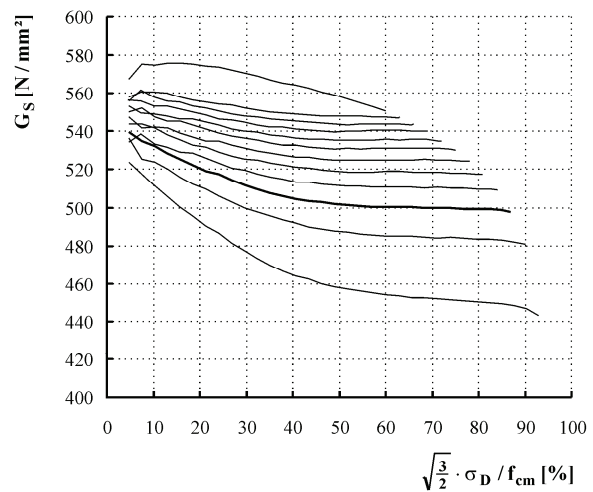
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade ausgewählter Zyklen



j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität

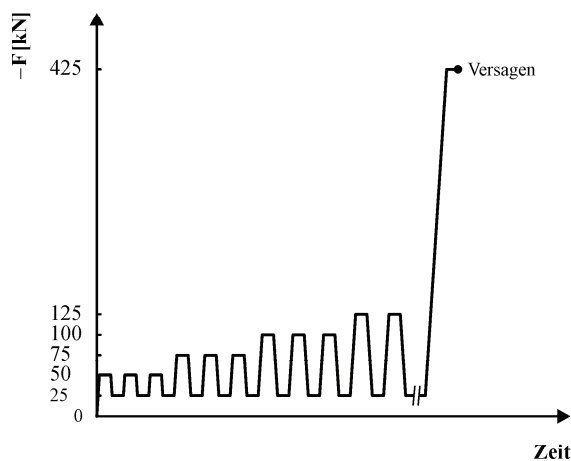


k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität, Belastungspfade

Anhang D: Probekörper aus Normalbeton und selbstverdichtendem hochfestem Beton

Die nachfolgenden Ergebnistafeln beziehen sich auf Versuche, die von Bolle (1999) und Schwabach (2005) an Normalbeton bzw. selbstverdichtendem hochfestem Beton durchgeführt wurden. Es wurden Probekörper unterschiedlichen Betonalters berücksichtigt. Einzelheiten zur Betonherstellung und zur Versuchsdurchführung sind in [Bolle 1999, Schwabach 2005] dargelegt.

Tafel D1: Probekörper Z1 (Normalbeton)

**schrittweise gesteigerte Belastung**

Quelle: Bolle (1999)

Material: Normalbeton

Betonalter bei Belastungsbeginn: >128 Tage

Probekörper: Zylinder mit $l = 30 \text{ cm}$, $d = 10 \text{ cm}$ Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: $0,2 \text{ N/mm}^2/\text{s}$

Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 180 s

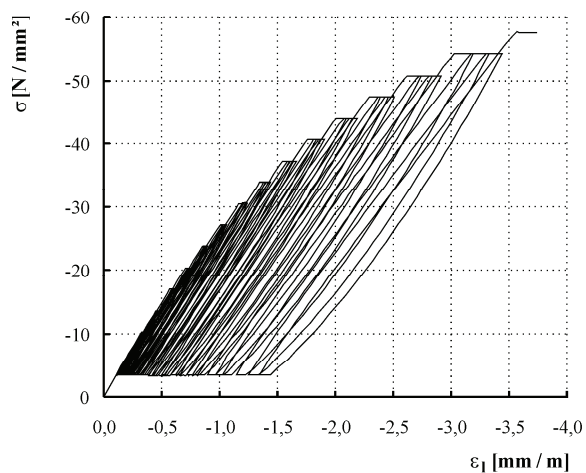
Grundlast: 25 kN

Laststufendifferenz: 25 kN

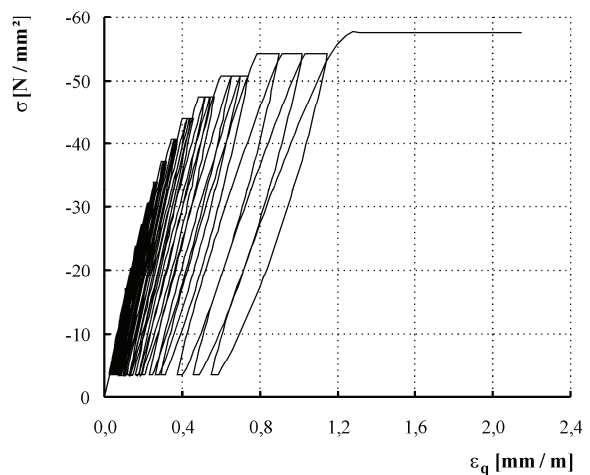
Zyklen je Laststufe: 3

Versagen bei Versuchsende

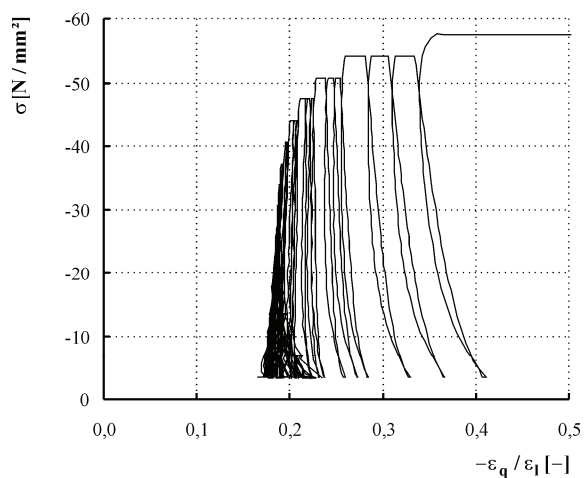
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



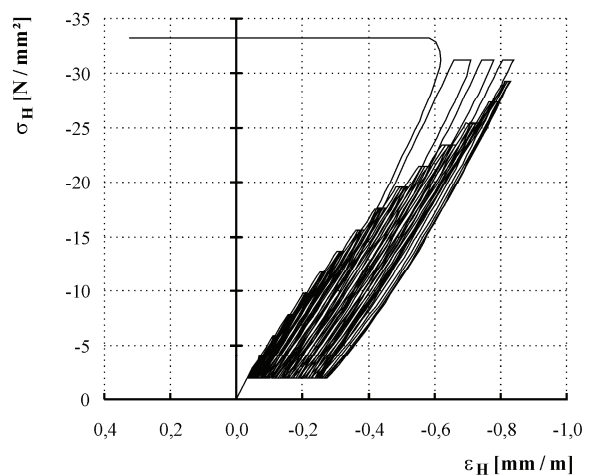
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



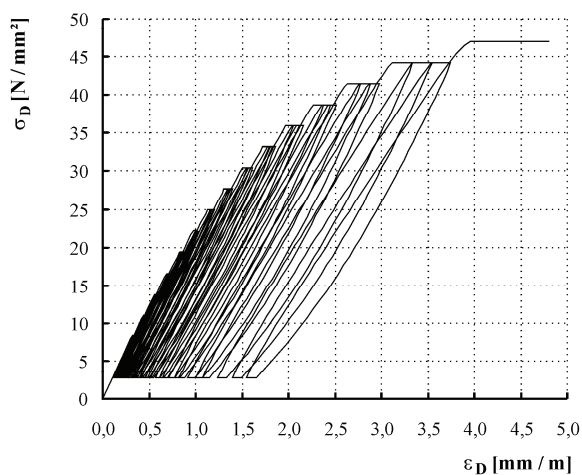
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Spannung



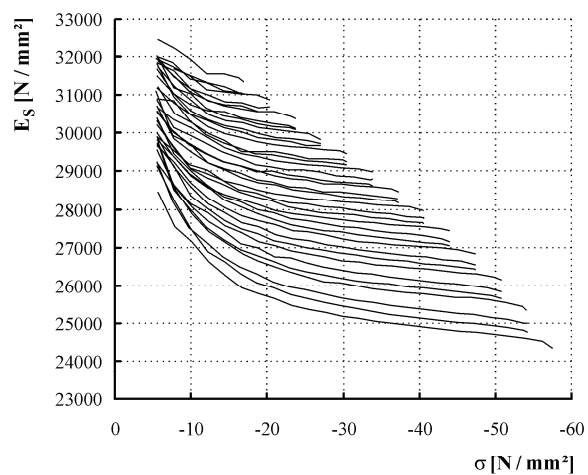
e) sphärische Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Tafel D1: Probekörper Z1 (Normalbeton)

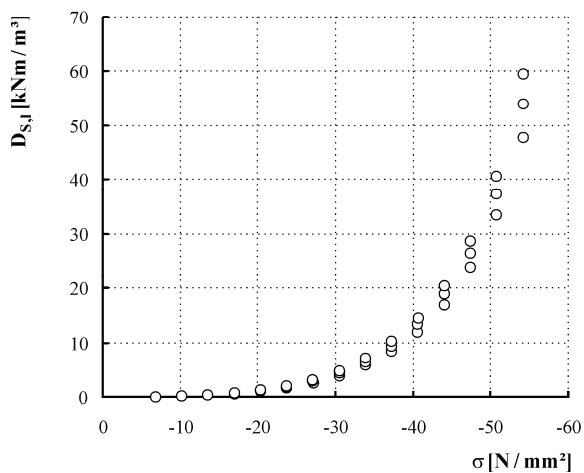
- Fortsetzung -



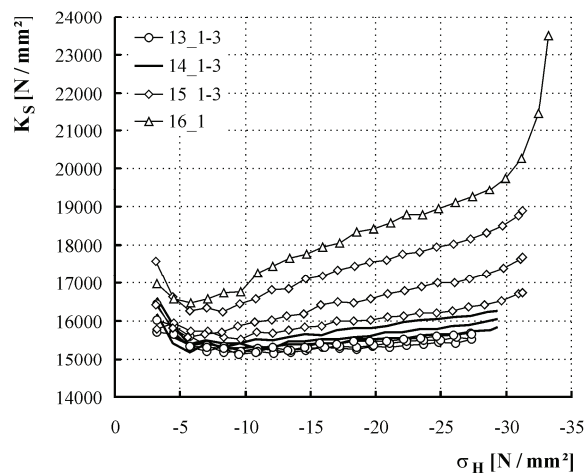
f) deviatorische Spannungs-Dehnungs-Beziehung



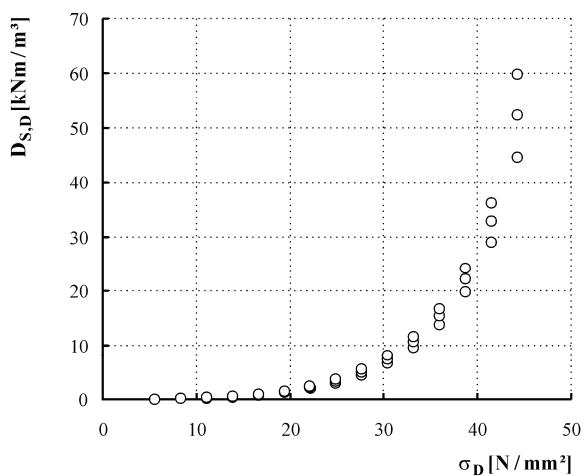
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Spannung, Belastungspfade



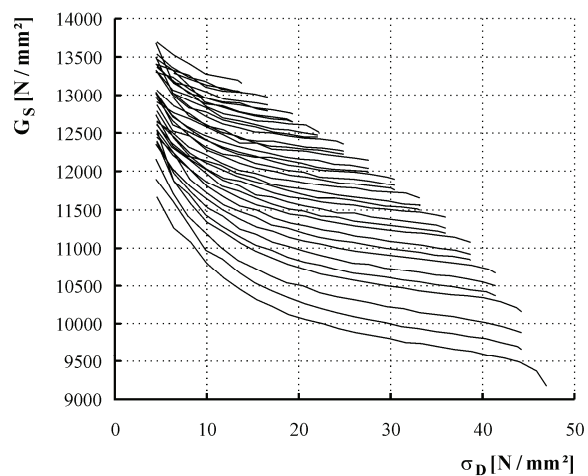
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Spannung



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der sphärischen Spannung, Belastungspfade ausgewählter Zyklen

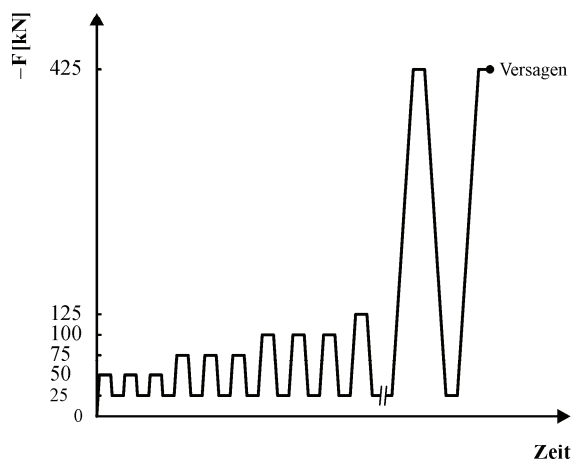


j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung



k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung, Belastungspfade

Tafel D2: Probekörper Z2 (Normalbeton)

**schrittweise gesteigerte Belastung**

Quelle: Bolle (1999)

Material: Normalbeton

Betonalter bei Belastungsbeginn: >128 Tage

Probekörper: Zylinder mit $l = 30 \text{ cm}$, $d = 10 \text{ cm}$ Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: $0,2 \text{ N/mm}^2/\text{s}$

Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 180 s

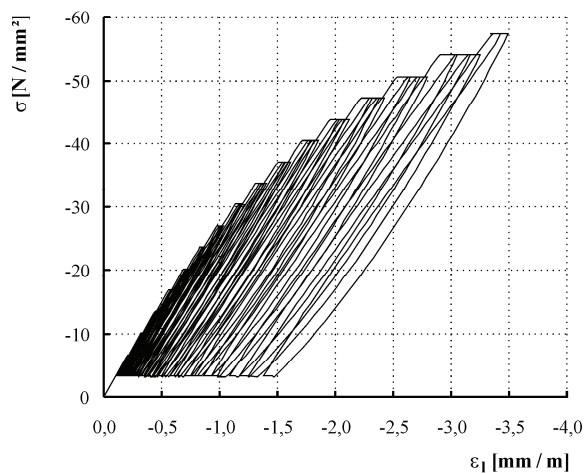
Grundlast: 25 kN

Laststufendifferenz: 25 kN

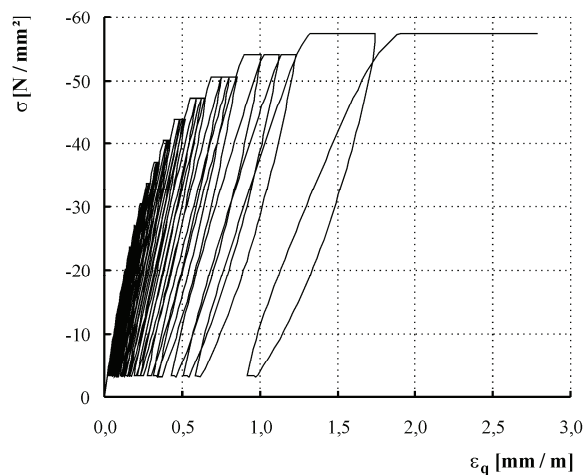
Zyklen je Laststufe: 3

Versagen bei Versuchsende

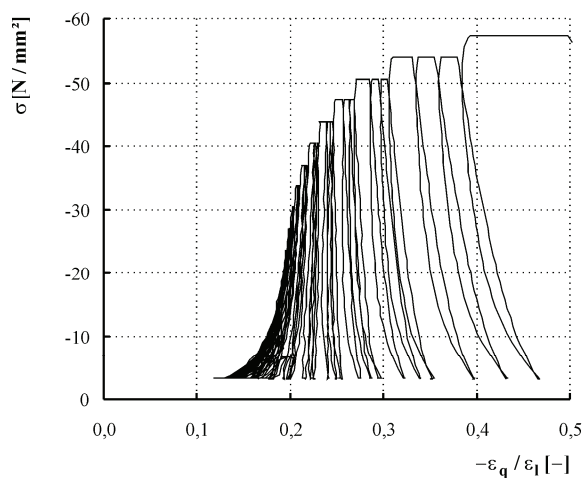
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



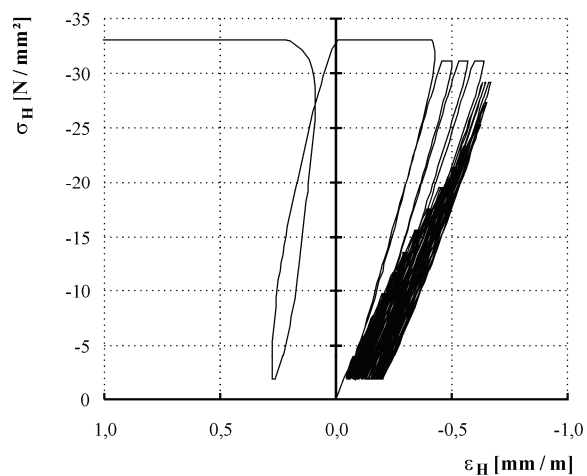
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



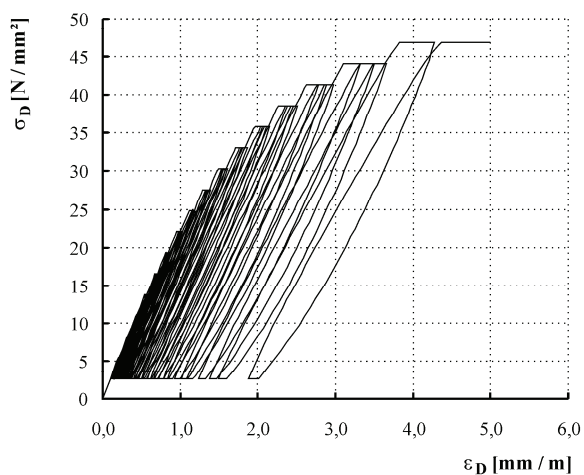
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Spannung



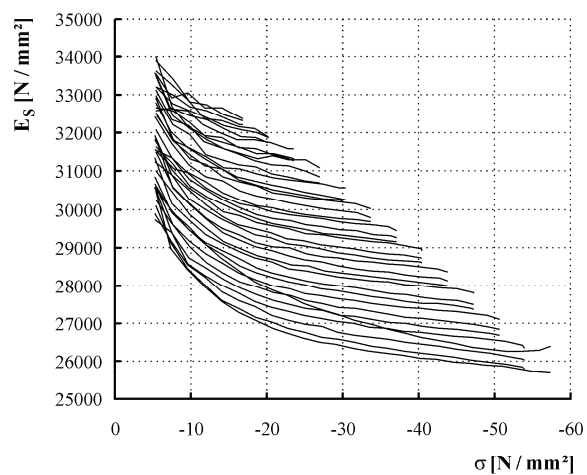
e) sphärische Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Tafel D2: Probekörper Z2 (Normalbeton)

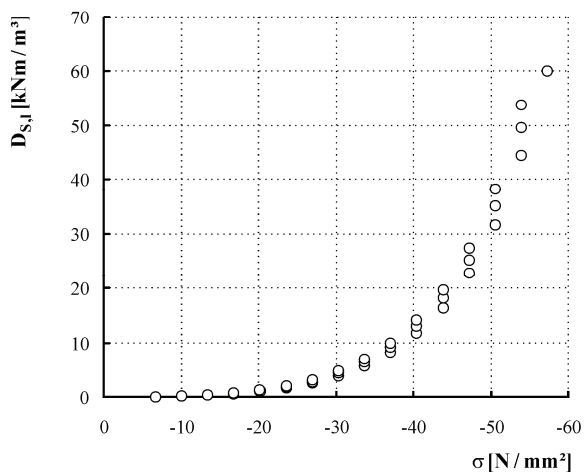
- Fortsetzung -



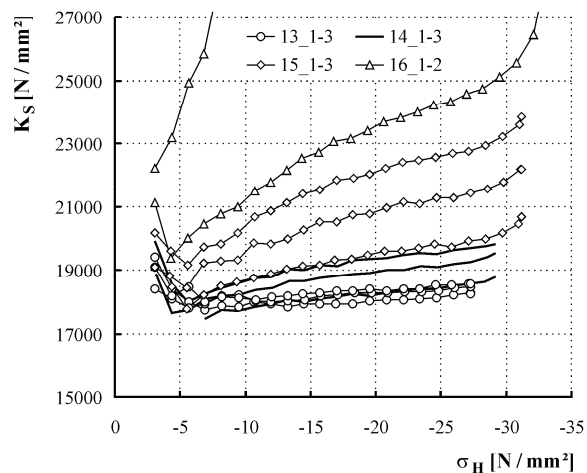
f) deviatorische Spannungs-Dehnungs-Beziehung



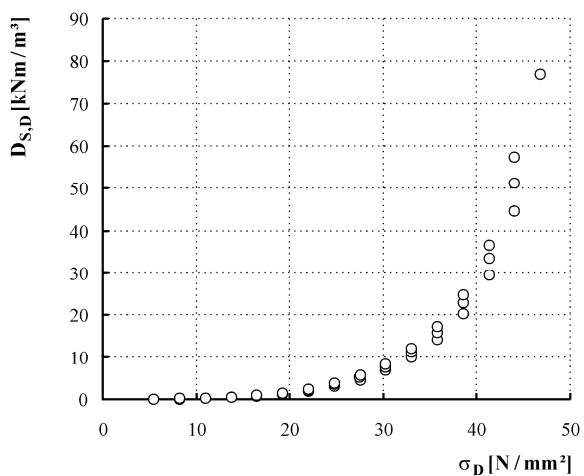
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Spannung, Belastungspfade



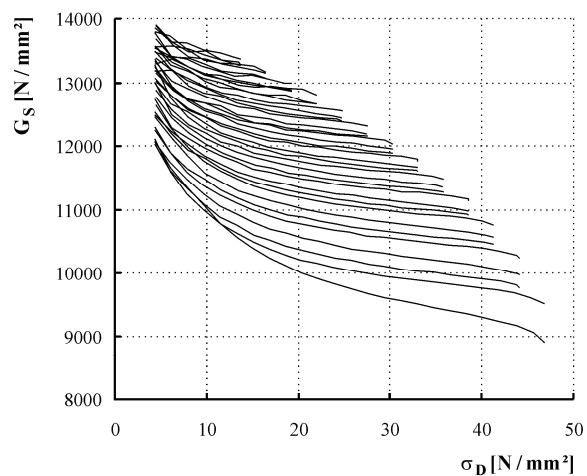
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Spannung



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der sphärischen Spannung, Belastungspfade ausgewählter Zyklen

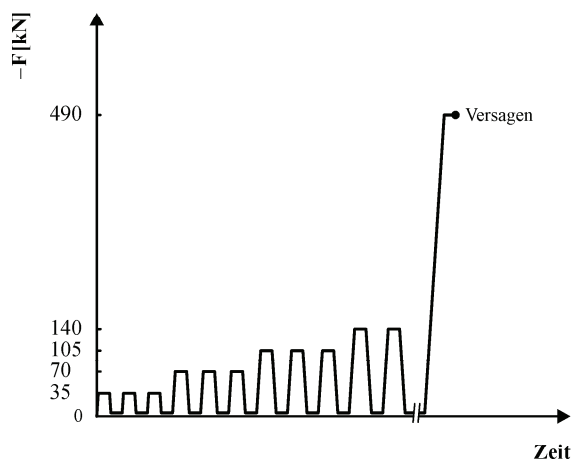


j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung



k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung, Belastungspfade

Tafel D3: Probekörper Cyl 02-07 (selbstverdichtender Beton)

**schrittweise gesteigerte Belastung**

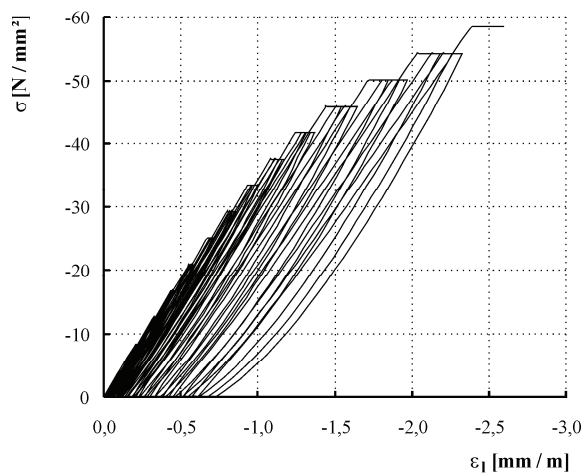
Quelle: Schwabach (2005)

Material: selbstverdichtender hochfester Beton
 Betonalter bei Belastungsbeginn: 7 Tage
 Probekörper: Zylinder mit $l = 30 \text{ cm}$, $d = 10 \text{ cm}$

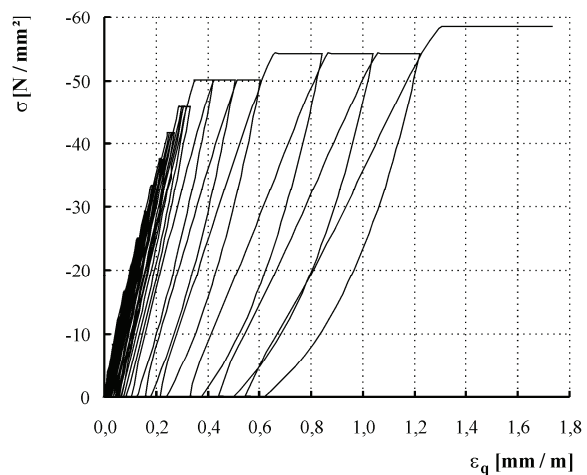
Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: $1,2 \text{ N/mm}^2/\text{s}$
 Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 180 s
 Grundlast: $0,5 \text{ kN}$
 Laststufendifferenz: 35 kN
 Zyklen je Laststufe: 3

Versagen bei Versuchsende

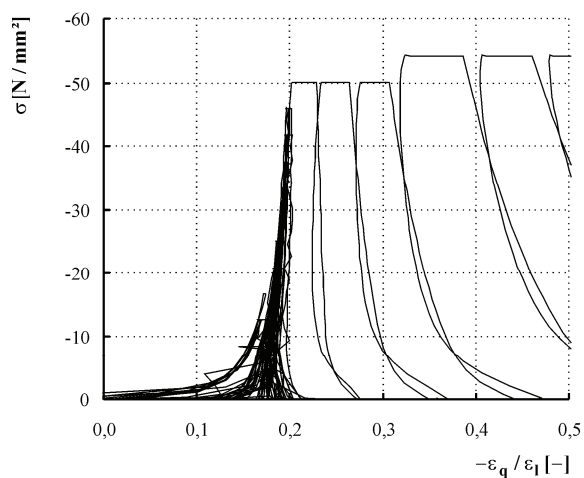
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



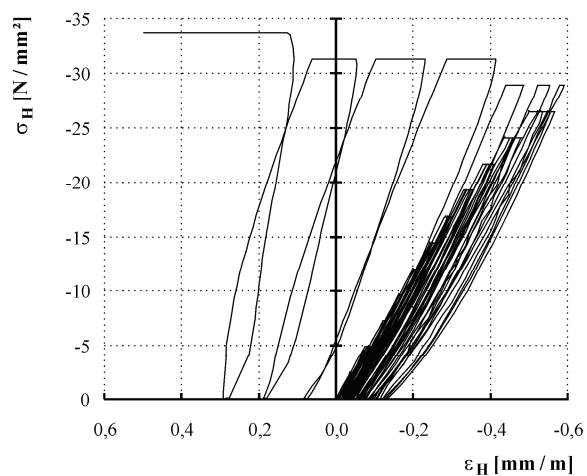
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



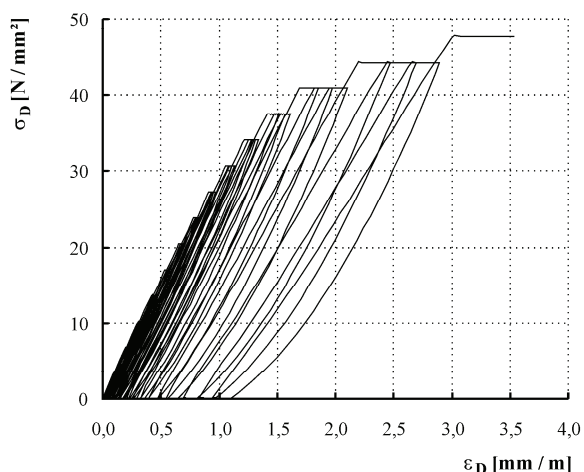
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Spannung



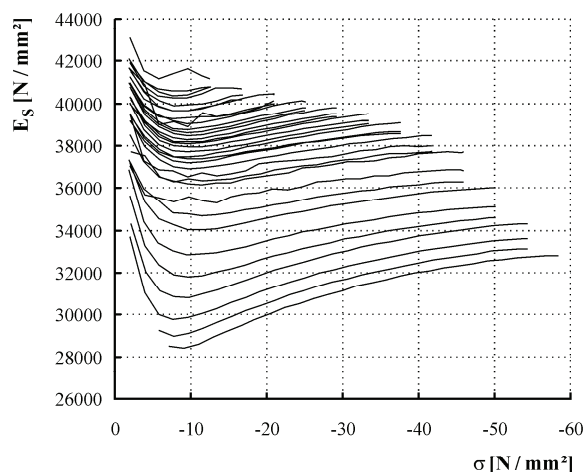
e) sphärische Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Tafel D3: Probekörper Cyl 02-07 (selbstverdichtender Beton)

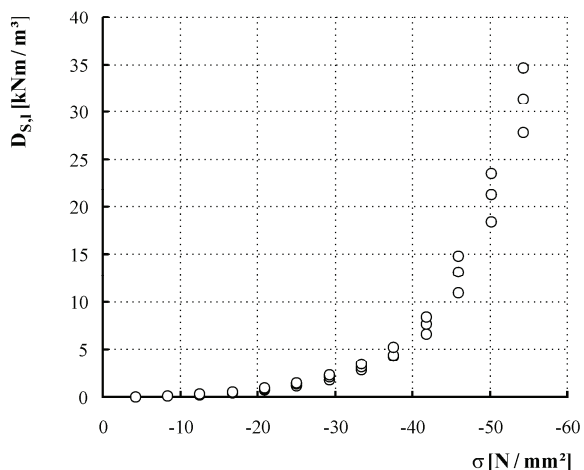
- Fortsetzung -



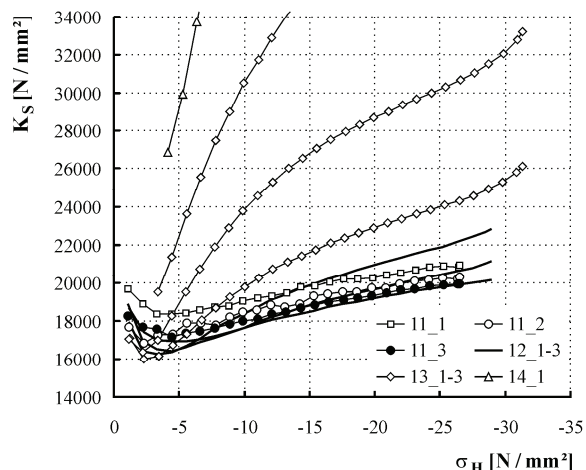
f) deviatorische Spannungs-Dehnungs-Beziehung



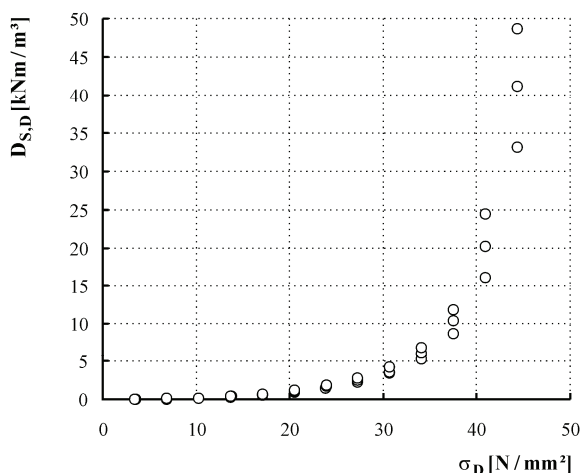
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Spannung, Belastungspfade



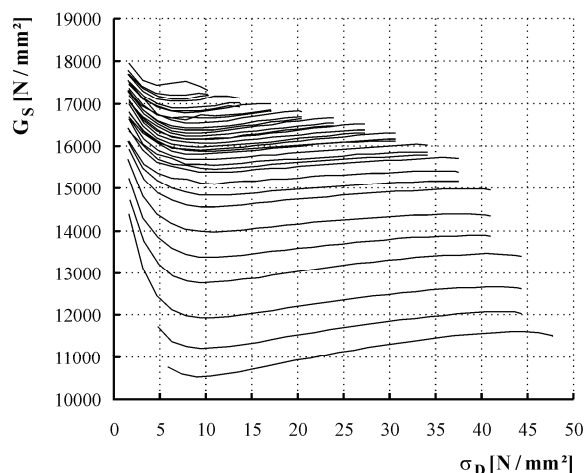
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Spannung



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der sphärischen Spannung, Belastungspfade ausgewählter Zyklen

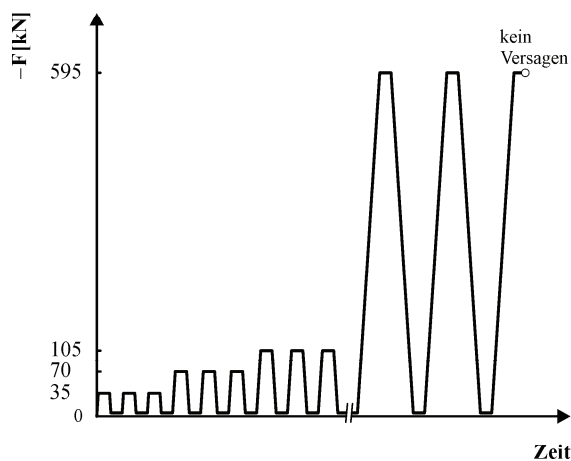


j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung



k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung, Belastungspfade

Tafel D4: Probekörper Cyl 01-28 (selbstverdichtender Beton)

**schrittweise gesteigerte Belastung**

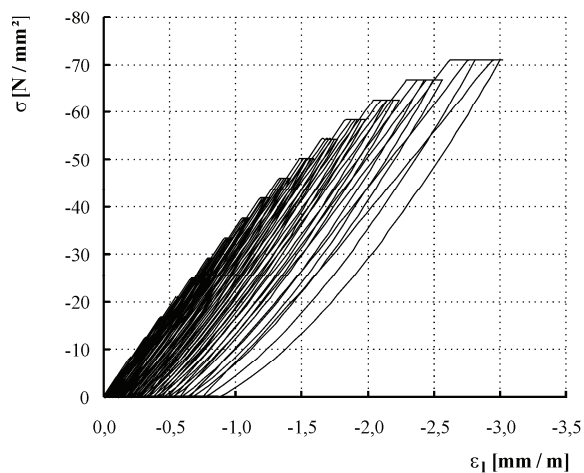
Quelle: Schwabach (2005)

Material: selbstverdichtender hochfester Beton
 Betonalter bei Belastungsbeginn: 28 Tage
 Probekörper: Zylinder mit $l = 30 \text{ cm}$, $d = 10 \text{ cm}$

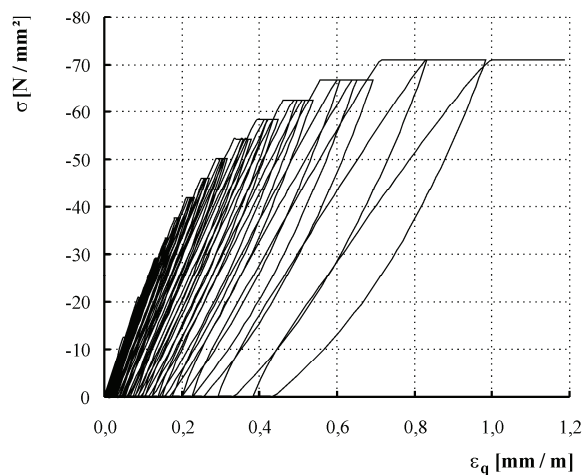
Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: $1,2 \text{ N/mm}^2/\text{s}$
 Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 180 s
 Grundlast: 0,5 kN
 Laststufendifferenz: 35 kN
 Zyklen je Laststufe: 3

kein Versagen bei Versuchsende

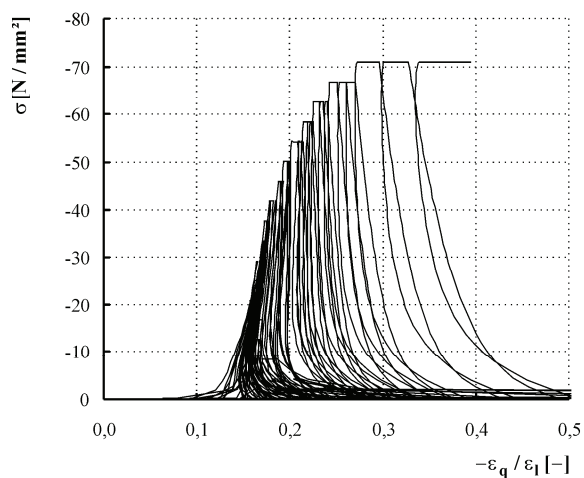
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



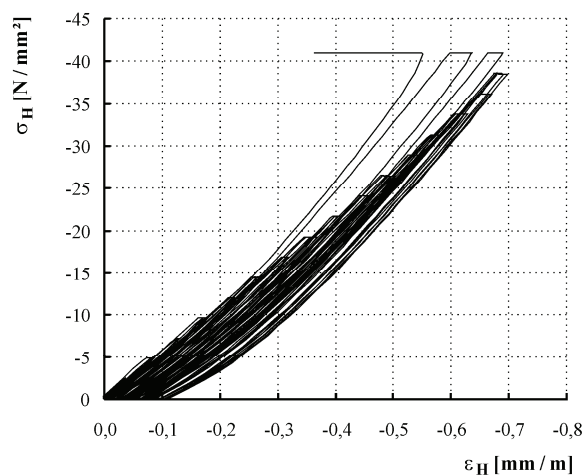
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



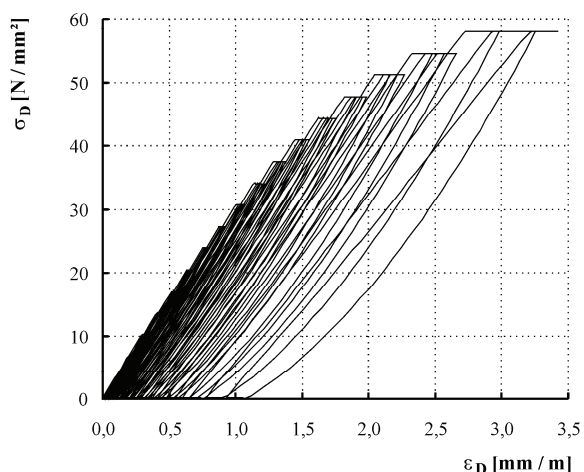
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Spannung



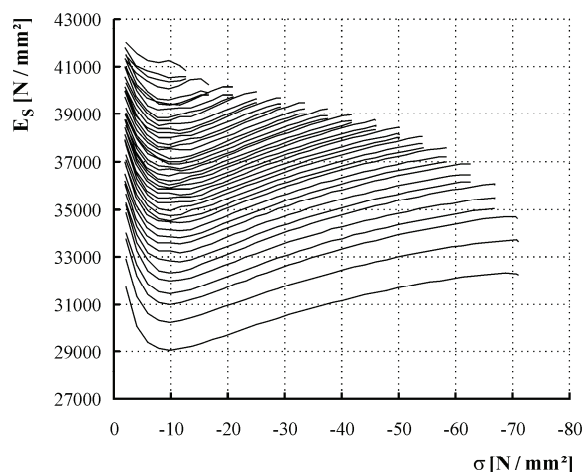
e) sphärische Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Tafel D4: Probekörper Cyl 01-28 (selbstverdichtender Beton)

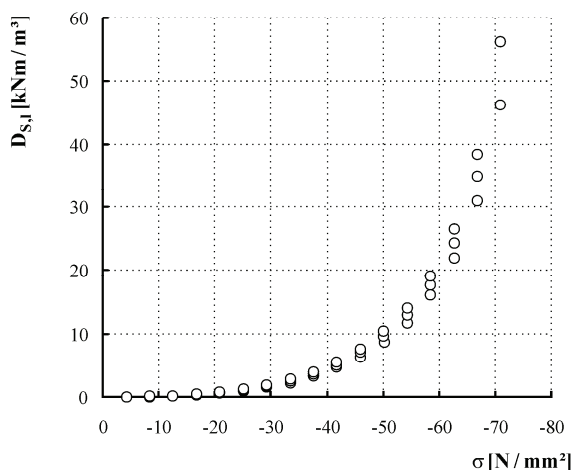
- Fortsetzung -



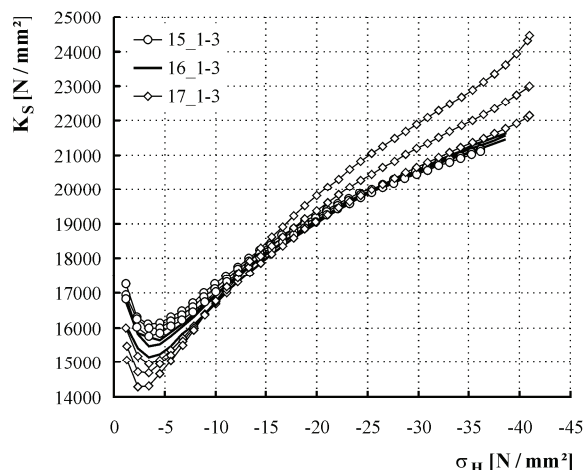
f) deviatorische Spannungs-Dehnungs-Beziehung



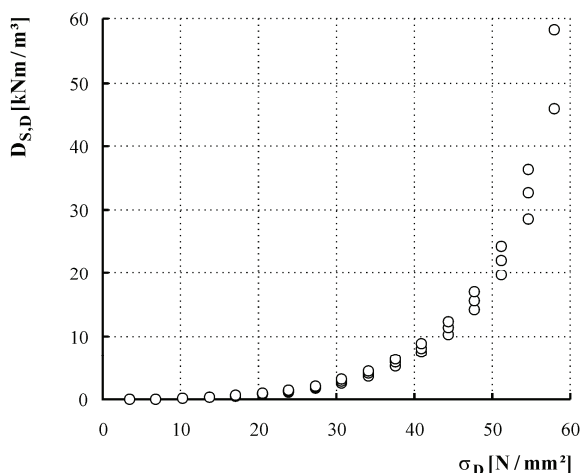
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Spannung, Belastungspfade



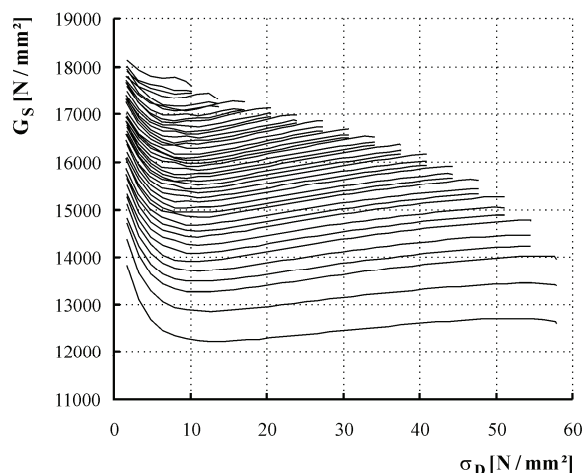
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Spannung



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der sphärischen Spannung, Belastungspfade ausgewählter Zyklen

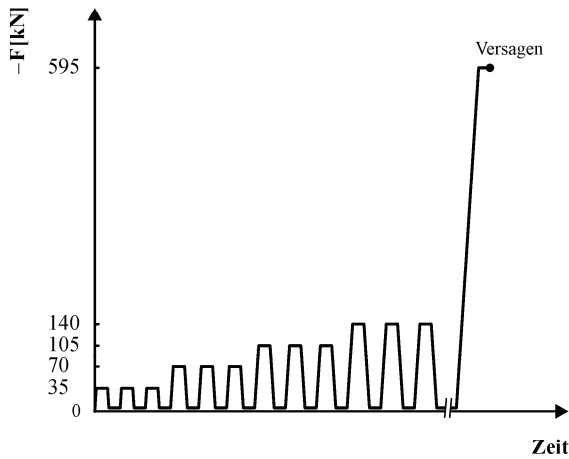


j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung



k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung, Belastungspfade

Tafel D5: Probekörper Cyl 02-70 (selbstverdichtender Beton)

**schrittweise gesteigerte Belastung**

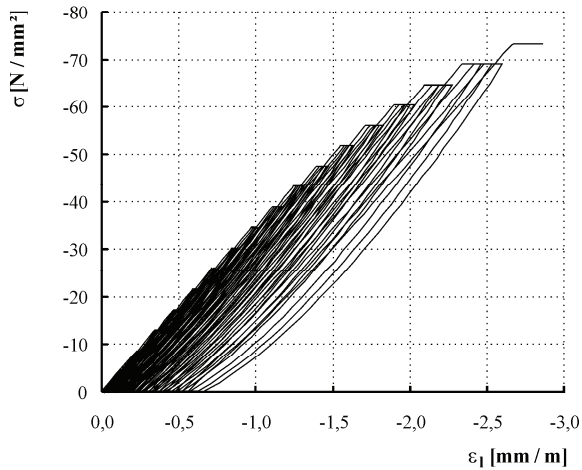
Quelle: Schwabach (2005)

Material: selbstverdichtender hochfester Beton
 Betonalter bei Belastungsbeginn: 70 Tage
 Probekörper: Zylinder mit $l = 30 \text{ cm}$, $d = 10 \text{ cm}$

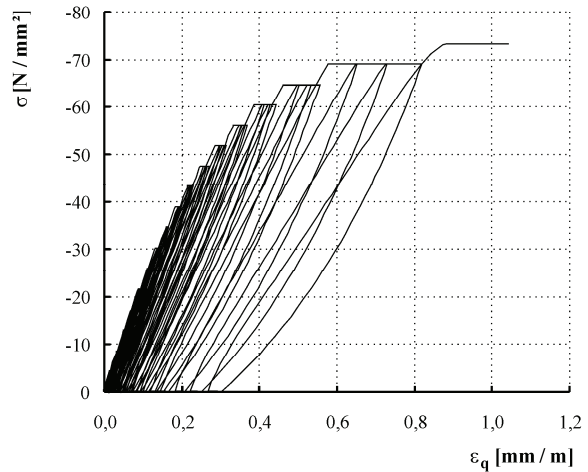
Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: $1,2 \text{ N/mm}^2/\text{s}$
 Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 180 s
 Grundlast: 0,5 kN
 Laststufendifferenz: 35 kN
 Zyklen je Laststufe: 3

Versagen bei Versuchsende

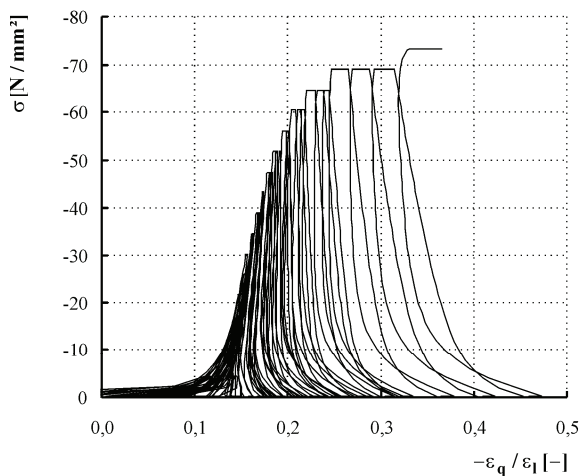
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



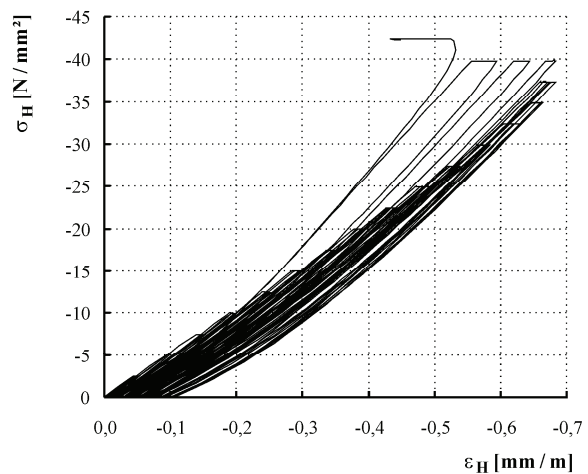
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



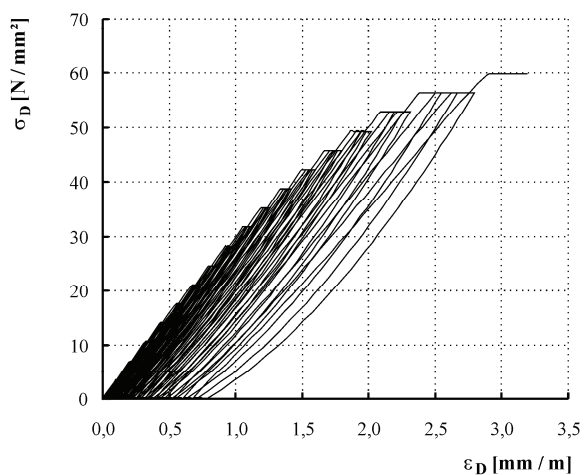
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Spannung



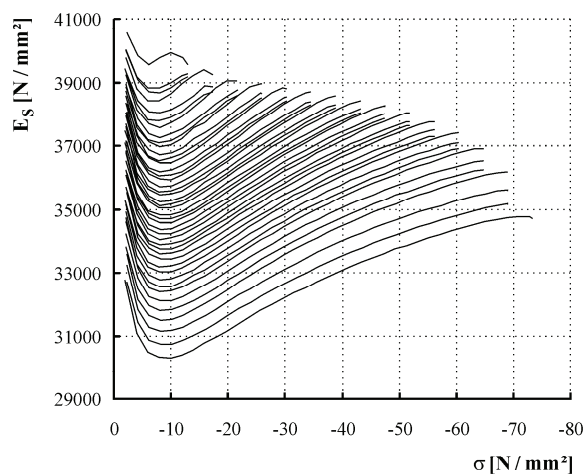
e) sphärische Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Tafel D5: Probekörper Cyl 02-70 (selbstverdichtender Beton)

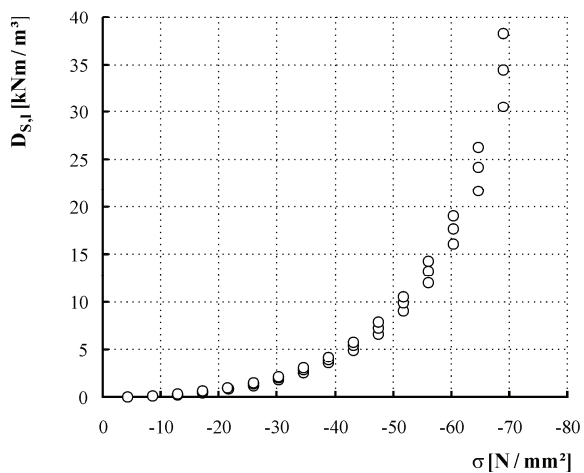
- Fortsetzung -



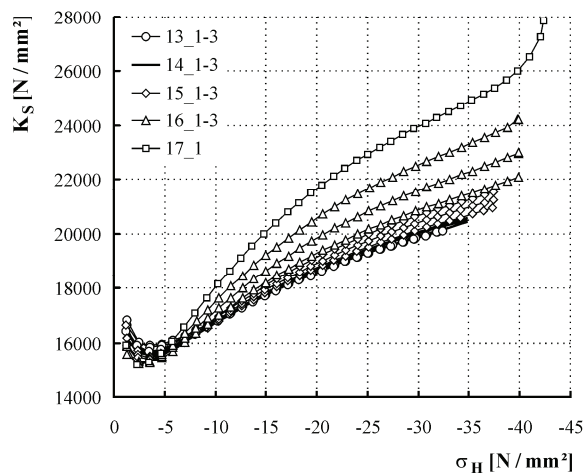
f) deviatorische Spannungs-Dehnungs-Beziehung



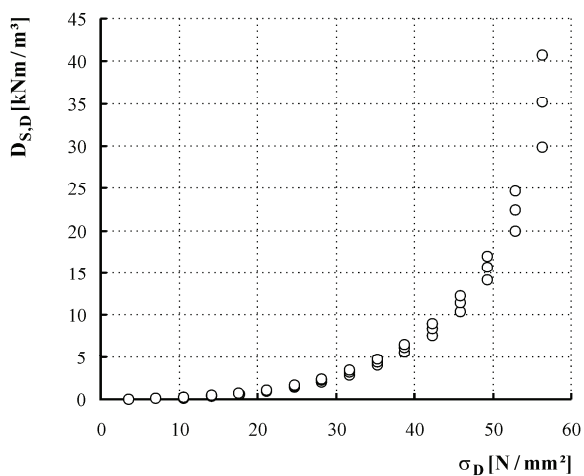
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Spannung, Belastungspfade



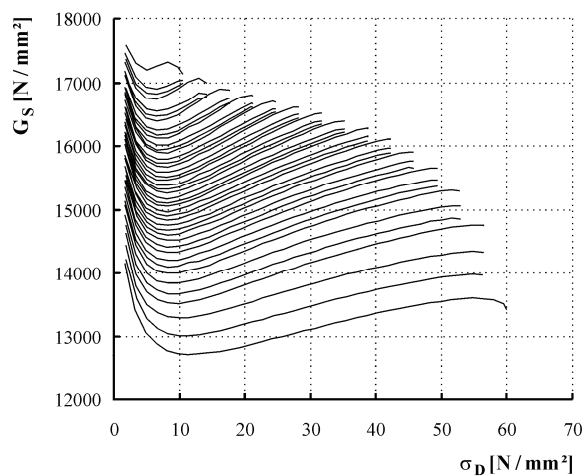
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Spannung



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der sphärischen Spannung, Belastungspfade ausgewählter Zyklen

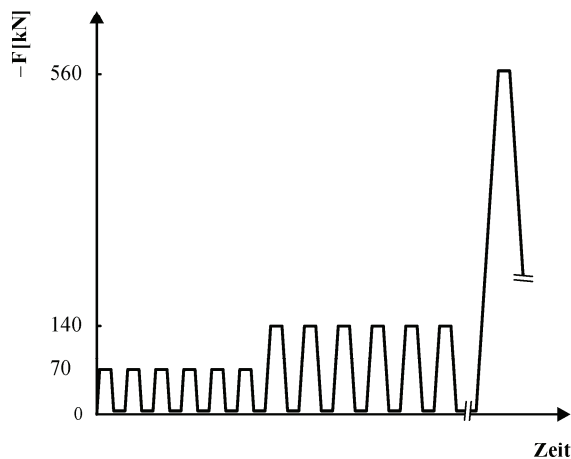


j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung



k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung, Belastungspfade

Tafel D6: Probekörper Cyl 02-91 (selbstverdichtender Beton)

**schrittweise gesteigerte Belastung**

Quelle: Schwabach (2005)

Material: selbstverdichtender hochfester Beton

Betonalter bei Belastungsbeginn: 91 Tage

Probekörper: Zylinder mit $l = 30 \text{ cm}$, $d = 10 \text{ cm}$ Be-/Entlastungsgeschwindigkeit: $1,2 \text{ N/mm}^2/\text{s}$

Haltezeit bei Voll-/Grundlast: 180 s

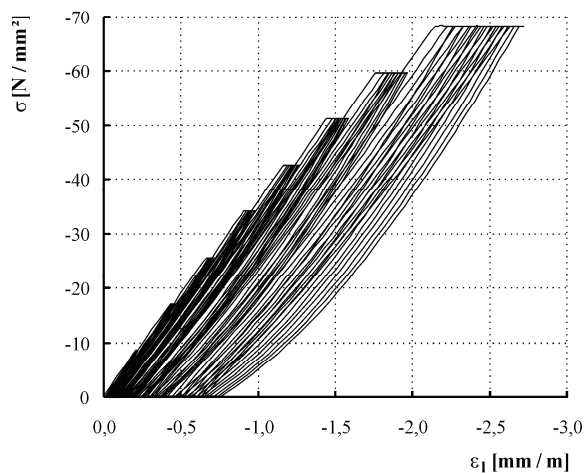
Grundlast: 0,5 kN

Laststufendifferenz: 70 kN

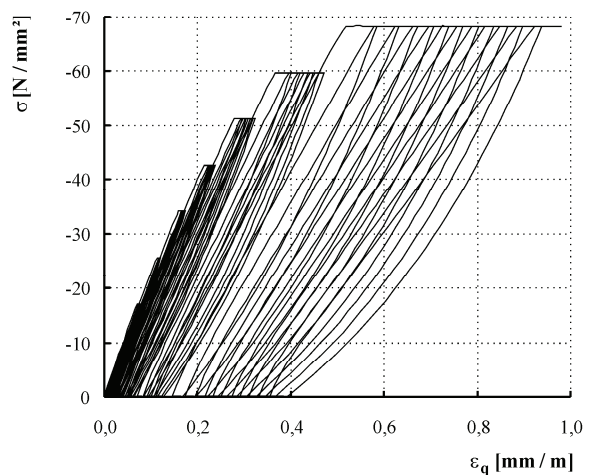
Zyklen je Laststufe: 6, letzte Laststufe: 12

kein Versagen bei Versuchsende

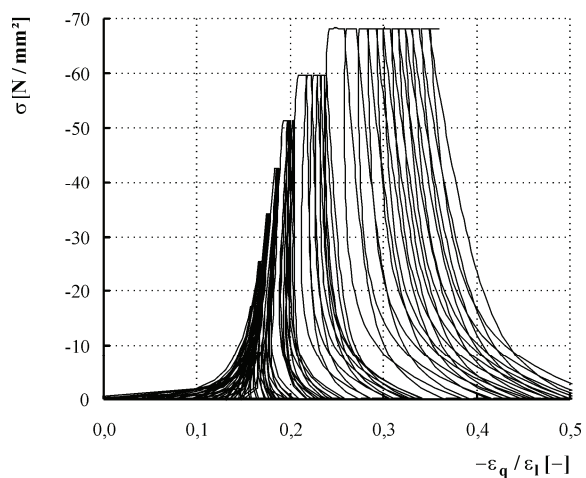
a) Belastungsregime (nicht maßstabsgerecht), ergänzende Bemerkungen



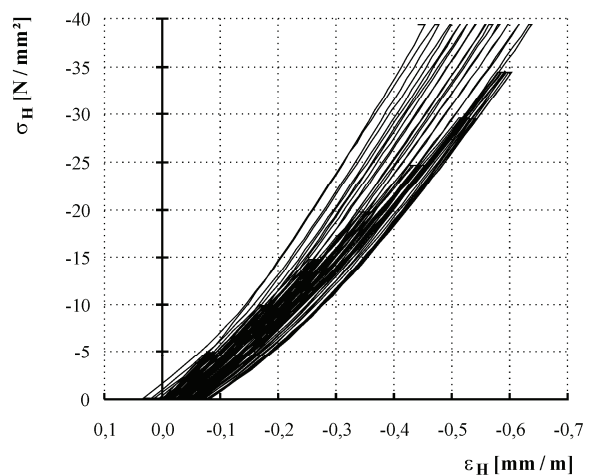
b) Spannungs-Längsdehnungs-Beziehung



c) Spannungs-Querdehnungs-Beziehung



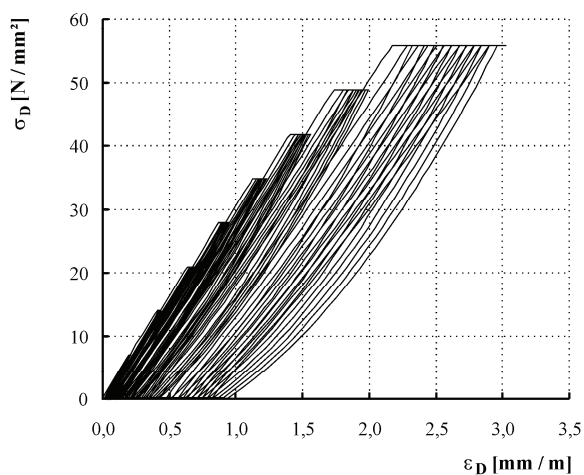
d) Querdehnung/Längsstauchung in Abhängigkeit von der Spannung



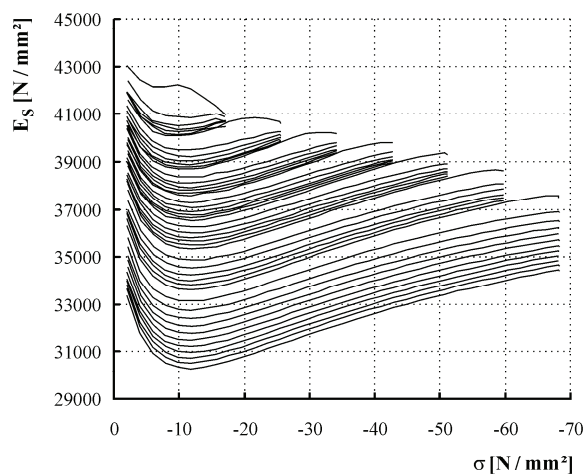
e) sphärische Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Tafel D6: Probekörper Cyl 02-91 (selbstverdichtender Beton)

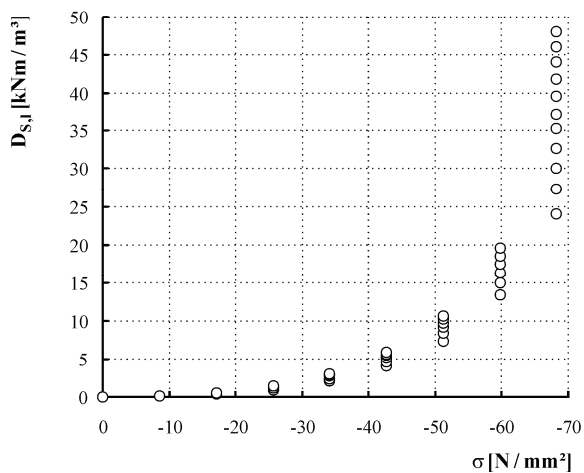
- Fortsetzung -



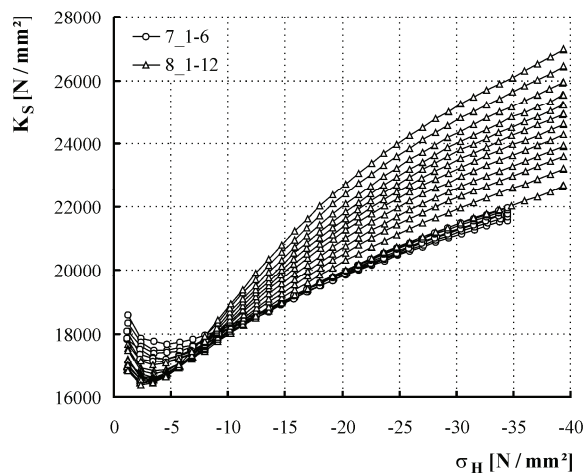
f) deviatorische Spannungs-Dehnungs-Beziehung



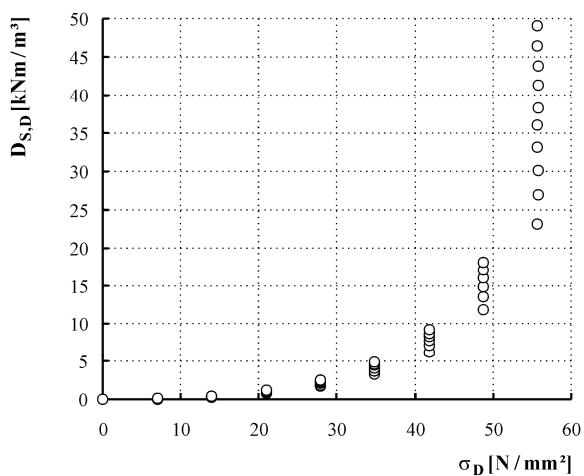
g) Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der Spannung, Belastungspfade



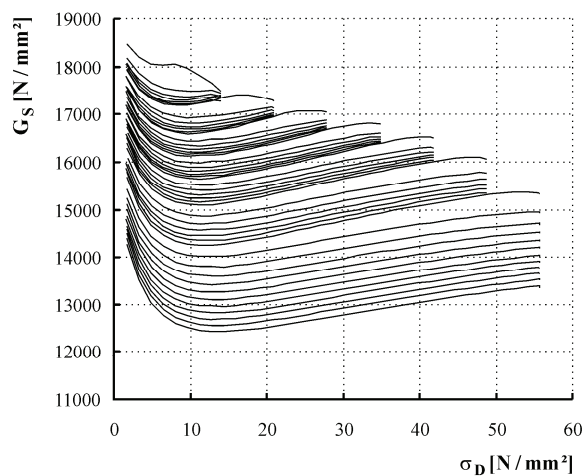
h) dissipierte Formänderungsenergie (Längsdehnungen) in Abhängigkeit von der Spannung



i) Kompressionsmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der sphärischen Spannung, Belastungspfade ausgewählter Zyklen



j) dissipierte Gestaltänderungsenergie in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung



k) Gleitmodul (Sekantenmodul) in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung, Belastungspfade